Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 14, No. 4 (2024) 379–406.

Paper Type: Original Article

Modeling a Sustainable and Resilient Supply Chain in the Automotive Industry

Seyedeh Mahboubeh Saeidifar[1], Iraj Mahdavi[1,*], Ali Tajdin[1], Nikbakhsh Javadian[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran;
Seyedeh.mahboubeh.saeidi@gmail.com; Irajustmb@gmail.com; Ali_tajdin@yahoo.com; Nijavadian@ustmb.ac.ir.

Citation:

Received: 26 June 2024 *Revised: 20 September 2024* *Accepted: 02 November 2024*	Saeidifar, S. M., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Javadian, N. (2024). Modeling a sustainable and resilient supply chain in the automotive industry. *Journal of quality engineering and management, 14*(4), 379-406.

Abstract

Purpose: This work addresses the automotive industry with two important evolving concepts namely sustainability and resiliency. The proposed model is designed to balance economic, environmental, and social objectives while maintaining adaptability to potential changes and disruptions in the supply chain. A real automotive company is then investigated as the case study problem to represent the applicability, validity and performance of the developed model, and eventually, render useful managerial and decision aids.

Methodology: To achieve this objective, a comprehensive decision-making model has been developed. In the first stage, supplier evaluation is conducted based on sustainability and resilience criteria. This assessment employs two innovative decision-making approaches: the stochastic fuzzy Best-Worst Method (BWM) and stochastic VIKOR. In the subsequent stage, a multi-objective mathematical model is formulated by incorporating stochastic-fuzzy uncertainty. To solve the model, a fuzzy robust optimization approach combined with a modified multi-choice goal programming method based on a utility function is applied.

Findings: In this study, the supply chain of SAIPA Kashan Automotive Company is analyzed by focusing on three key dimensions: general criteria, sustainability, and resilience. Indicators such as cost, quality, and energy consumption reduction were identified as the most critical evaluation factors. Supplier evaluation and ranking were carried out using the fuzzy VIKOR method. The results indicate that, among the main suppliers, the second and fifth options, and among the backup suppliers, the second option, received the highest scores. Furthermore, to assess the robustness and validity of the proposed approach, the obtained results were compared with those of conventional methods.

Originality/Value: The value of this research lies in presenting a comprehensive model for decision-making under uncertainty and improving supply chain performance from economic, environmental, and social perspectives. The findings can significantly assist managers and policymakers in the automotive industry in addressing complex supply chain challenges.

Keywords: Supply chain management, Sustainability, Resiliency, Automotive industry.

Corresponding Author: Irajustmb@gmail.com
10.48313/jqem.2025.514088.1508
Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۴، شماره (۴)، (۱۴۰۳)، ۴۰۶-۳۷۹

نوع مقاله: پژوهشی

مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تامین پایدار و تاب آور در صنعت خودرو

سیده محبوبه سعیدی فر[۱]، ایرج مهدوی[۱،*]، علی تاجدین[۱]، نیکبخش جوادیان[۱]

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش به ارایه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت طراحی زنجیره‌تامین پایدار با تاکید بر ابعاد تاب‌آوری پرداخته است. مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای توسعه یافته است که قادر به ایجاد تعادل بهینه میان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی باشد و هم‌زمان پاسخ مناسبی به تغییرات و اختلالات احتمالی در زنجیره‌تامین ارایه دهد. جهت اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل توسعه‌یافته، یک مطالعه موردی در صنعت خودروسازی انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی بوده و در نهایت ابزارها و راهکارهای مدیریتی کاربردی برای تصمیم‌گیرندگان زنجیره‌تامین ارایه گردیده است.

روش‌شناسی پژوهش: برای دستیابی به این هدف، یک مدل تصمیم‌گیری جامع توسعه یافته است. در مرحله نخست، امتیازدهی به تامین‌کنندگان با توجه به معیارهای پایداری و تاب‌آوری صورت می‌گیرد. این ارزیابی با بهره‌گیری از دو رویکرد نوآورانه تصمیم‌گیری، شامل روش بهترین-بدترین فازی تصادفی و روش ویکور تصادفی، انجام می‌پذیرد. در گام بعدی، یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های فازی-تصادفی طراحی شده است. به‌منظور حل این مدل، از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی و روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده مبتنی بر تابع مطلوبیت استفاده شده است.

یافته‌ها: در این پژوهش، زنجیره‌تامین شرکت خودروسازی سایپا کاشان با تمرکز بر سه بعد کلیدی شامل معیارهای عمومی، پایداری و تاب‌آوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص‌هایی نظیر هزینه، کیفیت و کاهش مصرف انرژی به‌عنوان مهم‌ترین معیارها شناسایی شده‌اند. ارزیابی و رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با استفاده از روش ویکور فازی انجام پذیرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در میان تامین‌کنندگان اصلی، گزینه‌های دوم و پنجم و در میان تامین‌کنندگان پشتیبان، گزینه دوم، بالاترین امتیازات را کسب کرده‌اند. افزون بر این، به‌منظور بررسی استواری و اعتبار رویکرد پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده با روش‌های سنتی مقایسه گردیده‌اند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: ارزش‌افزوده این پژوهش در ارایه یک مدل جامع تصمیم‌گیری در شرایط عدم‌قطعیت نهفته است که به بهبود عملکرد زنجیره‌تامین از جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی کمک می‌کند. یافته‌های تحقیق می‌توانند نقش موثری در حمایت از تصمیم‌گیری مدیران و سیاست‌گذاران صنعت ایفا کرده و آن‌ها را در مواجهه با چالش‌های پیچیده و پویای زنجیره‌تامین یاری رسانند.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره تامین، پایداری، تاب‌آوری، صنعت خودرو.

۱- مقدمه

در محیط رقابتی کنونی، موضوع زنجیره‌تامین به یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران سازمان‌ها و نهادهای مختلف تبدیل شده است. مدیران امروزی دریافته‌اند که برای بهبود بهره‌وری واحد اقتصادی خود و دستیابی به مزیت رقابتی پایدار، طراحی بهینه زنجیره‌تامین امری ضروری است [1].

به همین دلیل، طی سال‌های اخیر، مدیریت زنجیره‌تامین به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علمی تبدیل‌شده و تحقیقات متعددی در این زمینه انجام پذیرفته است. در رویکردهای سنتی، مسایل زنجیره‌تامین عمدتا بر اساس شاخص‌های عمومی یا عملکردی نظیر هزینه، زمان تحویل و کیفیت توسط پژوهشگران و مدیران بررسی می‌شد. با این‌حال، در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسعه فناوری، تشدید رقابت در میان

زنجیره‌های تامین، وقوع اختلالات غیرمنتظره و عوامل مشابه، موجب شده است تا ویژگی‌های جدیدی برای بهبود عملکرد زنجیره‌های تامین موردتوجه قرار گیرد. این تغییر رویکرد، زمینه‌ساز انجام تحقیقات متعددی در این حوزه شده است [2]، [3].

در سال‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، توجه پژوهشگران به طراحی شبکه زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، ازجمله کاهش انتشار کربن، معطوف شده است [4]، [5]. این رویکرد که با عنوان زنجیره‌تامین سبز شناخته می‌شود، زمینه‌ساز انجام پژوهش‌های گسترده‌ای در این حوزه بوده است. به‌تدریج، ابعاد اجتماعی نظیر اشتغال‌زایی و ارتقای ایمنی نیز در طراحی و مدیریت زنجیره‌های تامین موردتوجه قرار گرفت و مفهومی با عنوان طراحی شبکه زنجیره‌تامین با ملاحظات اجتماعی شکل گرفت. در همین راستا، و با هدف دستیابی به توسعه پایدار در زنجیره‌های تامین، پژوهشگران به طراحی شبکه‌هایی پرداختند که هم‌زمان سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را مدنظر قرار می‌دهند. به‌طورکلی، زمانی که این سه بعد به‌صورت هم‌زمان در طراحی شبکه لحاظ شوند، شبکه حاصل به‌عنوان زنجیره‌تامین پایدار شناخته می‌شود [6]، [7]، [8]. برای درک اهمیت پایداری در کسب‌وکار، می‌توان به نمونه‌هایی از شرکت‌هایی اشاره کرد که به دلیل تمرکز صرف بر رویکردهای سنتی زنجیره‌تامین، با شکست مواجه شدند. به‌عنوان نمونه، فروپاشی ساختمان رانا پلازا در ۲۴ آوریل ۲۰۱۳ که به کشته شدن بیش از هزار کارگر انجامید، و همچنین رسوایی مرتبط با تولید روغن پالم که بهره‌کشی‌های اجتماعی و آسیب‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای را در زنجیره‌تامین برخی از شرکت‌های بزرگ آشکار ساخت، ازجمله مصادیق بارز این مساله به شمار می‌روند.

از سوی دیگر، همه‌گیری ویروس کرونا به‌روشنی نقاط ضعف صنایع امروزی را آشکار ساخت؛ به‌گونه‌ای که در مدت کوتاهی پس از آغاز این بحران، بسیاری از کسب‌وکارها با اختلالات جدی مواجه شدند که در برخی موارد به تعلیق یا حتی تعطیلی آن‌ها انجامید [9]. به‌عنوان نمونه، شیوع کووید-۱۹ که از شهر ووهان چین، به‌عنوان یکی از مراکز جهانی صنایع خودروسازی، الکترونیک و تجهیزات پزشکی آغاز شد، به‌دلیل اعمال قرنطینه و محدودیت‌های گسترده، مانع از جابه‌جایی افراد و مواد از این منطقه گردید. این موضوع موجب اختلال در بسیاری از زنجیره‌های تامین جهانی وابسته به ووهان شد. به‌طور مشابه، شرکت هیوندای نیز ناچار شد به‌دلیل تأخیر در تامین مواد اولیه ناشی از شیوع ویروس کرونا در چین، خطوط تولید خود در کره جنوبی را متوقف کند. این نمونه‌ها، ضرورت اتخاذ رویکردهایی جهت افزایش تاب‌آوری و توانمندی صنایع در مواجهه با اختلالات مشابه را برای پژوهشگران و مدیران برجسته ساخت. در این میان، یکی از مفاهیم کلیدی در حوزه زنجیره تامین، مفهوم تاب‌آوری است. به‌طور کلی، تاب‌آوری به توانایی زنجیره‌تامین در بازگشت به وضعیت عادی پس از وقوع اختلالات و بحران‌ها به‌منظور پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان اشاره دارد [10-12].

با توجه به اینکه عدم قطعیت بخش جدایی‌ناپذیر محیط کسب‌وکار محسوب می‌شود و پیش‌بینی دقیق پارامترهایی مانند تقاضای مشتریان بسیار دشوار است [13]، یکی از چالش‌های اساسی مدیران و پژوهشگران در حوزه زنجیره تامین، مواجهه با این عدم قطعیت است. بی‌توجهی به این ویژگی ذاتی مساله و نادیده گرفتن آن در مرحله برنامه‌ریزی زنجیره‌تامین می‌تواند منجر به ارایه راهکارهای غیرواقعی و در نهایت، آسیب‌های جدی به کسب‌وکار شود. بنابراین، لحاظ کردن عدم قطعیت در فرآیند طراحی شبکه زنجیره‌تامین امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید [13-16].

صنعت خودروسازی یکی از بزرگ‌ترین و اثرگذارترین صنایع جهان به‌شمار می‌رود که نقش به‌سزایی در اقتصاد و جامعه ایفا می‌کند. این صنعت تاثیرات گسترده‌ای بر جنبه‌های مختلف زندگی افراد، توسعه اقتصادی، حمل‌ونقل و ارتباطات، تحقیق و توسعه، محیط‌زیست و رفاه شهری دارد و از این‌رو، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ساختار زنجیره‌تامین در صنعت خودروسازی در کشورهای مختلف می‌تواند بسیار متنوع باشد و به عواملی هم‌چون سطح توسعه صنعت خودروسازی، سیاست‌های حمایتی دولت، میزان تولید داخلی قطعات و مواد اولیه و همچنین حضور تولیدکنندگان محلی و بین‌المللی بستگی دارد [17]، [18].

استراتژی‌های پایداری در زنجیره‌تامین صنعت خودروسازی از اهمیت بالایی برخوردارند، چراکه این صنعت با چالش‌های متعددی در حوزه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی مواجه است. توجه به اصول پایداری در این زنجیره نه‌تنها می‌تواند به کاهش آثار منفی زیست‌محیطی منجر شود، بلکه موجب ارتقا کارایی و بهره‌وری در فرآیندهای تولید نیز خواهد شد.

یکی از استراتژی‌های رایج در این زمینه، استفاده از مواد بازیافتی و کاهش مصرف منابع طبیعی است. بسیاری از شرکت‌های خودروسازی، ازجمله جنرال موتورز، تلاش می‌کنند تا از مواد بازیافتی در تولید قطعات خودرو بهره بگیرند. این رویکرد ضمن کاهش مصرف انرژی و منابع معدنی، آثار منفی زیست‌محیطی ناشی از استخراج مواد اولیه را نیز کاهش می‌دهد.

علاوه بر این، بسیاری از خودروسازان به سمت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهینه‌سازی مصرف سوخت در محصولات خود حرکت کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، شرکت تو یوتا با تولید خودروهای هیبریدی و برقی، نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا و مصرف سوخت ایفا کرده است. اتخاذ چنین استراتژی‌هایی نه‌تنها آثار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه از منظر اقتصادی نیز مزایایی به همراه دارد؛ چراکه تقاضا برای خودروهای سبز و دوستدار محیط‌زیست در بازارهای جهانی رو به افزایش است.

در نهایت، توجه به پایداری اجتماعی در زنجیره‌تامین خودرو نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌عنوان مثال، شرکت‌هایی که به تامین حقوق کارگران و رعایت استانداردهای کار شفاف در تامین‌کنندگان خود اهمیت می‌دهند، می‌توانند به تقویت اعتبار برند خود و ارتقا روابط تجاری با شرکای مختلف کمک کنند.

یکی از مهم‌ترین استراتژی‌ها برای کاهش اختلالات و ریسک‌های حاصل از زنجیره‌تامین در صنعت خودرو، تمرکز بر تاب‌آوری زنجیره‌تامین است [19]، [20]. برای درک بهتر مفهوم تاب‌آوری در زنجیره تامین، می‌توان به مثال زیر اشاره کرد. پس از وقوع زلزله سال ۲۰۱۱ در ژاپن، خطوط تولید بسیاری از شرکت‌های خودروسازی دچار آسیب و توقف شدند. شواهد نشان می‌دهد که کارخانه نیسان موتور، علی‌رغم تحمل آسیب‌های فیزیکی گسترده و زیان‌های قابل‌توجه، روند بازیابی سریع‌تری نسبت به سایر رقبا داشت. درحالی‌که شش ماه پس از حادثه، میزان کاهش تولید نیسان تنها حدود چهار درصد بود، سایر شرکت‌ها به‌طور میانگین با کاهش ۲۴/۸% تولید مواجه شدند. این عملکرد چشمگیر نیسان موتور را می‌توان نتیجه پیاده‌سازی مولفه‌های تاب‌آوری در سطح کارخانه و زنجیره‌تامین آن دانست. این مثال به‌خوبی نقش حیاتی و تاثیرگذار تاب‌آوری در زنجیره‌تامین صنعت خودروسازی را نمایان می‌سازد.

با توجه به اهمیت روزافزون موضوعات پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تامین، پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی چندهدفه زنجیره‌تامین پایدار با در نظر گرفتن استراتژی‌های تاب‌آوری در صنعت خودروسازی انجام گرفته است. در این راستا، یک مدل تصمیم‌گیری دو مرحله‌ای طراحی شده است که در آن، خروجی مرحله اول به‌عنوان ورودی مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در **گام ۱**، امتیاز تامین‌کنندگان بالقوه بر اساس شاخص‌های مرتبط با مساله تحقیق محاسبه می‌شود. برای این منظور، ابتدا معیارهای مرتبط با زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور، با بهره‌گیری از مطالعات پیشین و نظرات خبرگان شناسایی می‌شوند. سپس، وزن و اهمیت این معیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین تصادفی تعیین می‌گردد. در ادامه، با استفاده از روش ویکور تصادفی، امتیاز تامین‌کنندگان بالقوه بر مبنای معیارهای یادشده محاسبه می‌شود.

در **گام ۲**، به‌منظور طراحی شبکه زنجیره‌تامین پیشنهادی، یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت به‌صورت ترکیبی از فازی و تصادفی ارایه می‌شود. برای مقابله با عدم قطعیت، از روش بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی استفاده شده و جهت حل مدل نیز از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت بهره گرفته می‌شود.

به‌صورت کلی، اهداف اصلی این پژوهش به شرح زیر هستند:

۱. شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای پایداری و تاب‌آوری با استفاده از روش بهترین-بدترین تصادفی در شرایط عدم‌قطعیت.
۲. رتبه‌بندی تامین‌کنندگان بالقوه بر اساس شاخص‌های شناسایی‌شده با بهره‌گیری از روش ویکور تصادفی.
۳. طراحی یک مدل ریاضی چندهدفه در محیط فازی-تصادفی به‌منظور بهینه‌سازی هم‌زمان پنج هدف کلیدی شامل هزینه، انتشار، پیچیدگی، سطح خدمات و امتیاز تامین‌کننده.
۴. مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با مدل‌های مرجع قطعی جهت ارزیابی پایداری، اثربخشی عددی و کاربردپذیری مدل ارایه‌شده.

در مجموع، این پژوهش در پی پاسخ‌گویی به پرسش‌های زیر است:

۱. معیارهای زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور کدام‌اند؟
۲. مهم‌ترین (با اهمیت‌ترین) معیارهای پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تامین صنعت خودرو کدام‌اند؟

۳. جایگاه تامین‌کنندگان بر مبنای شاخص‌های مساله تحقیق چگونه است؟

۴. مدل‌سازی چندهدفه زنجیره‌تامین پایدار در صنعت خودرو با ابعاد تاب‌آوری چگونه است؟

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در حوزه‌های مختلف مرتبط با زنجیره‌تامین انجام شده است. همان‌طور که در مقدمه این مطالعه اشاره شد، هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل‌سازی چندهدفه زنجیره‌تامین پایدار در صنعت خودروسازی با در نظر گرفتن ابعاد تاب‌آوری و شرایط عدم قطعیت است.

در همین راستا، ابتدا مروری جامع بر پژوهش‌های برجسته‌ای ارایه می‌شود که در آن‌ها از استراتژی‌های پایداری یا تاب‌آوری در زنجیره‌تامین بهره گرفته شده است. سپس مطالعاتی که به بررسی زنجیره‌تامین تحت شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در پایان، شکاف‌های تحقیقاتی موجود شناسایی‌شده و نقش و نوآوری پژوهش حاضر در پر کردن این شکاف‌ها به‌طور دقیق تبیین خواهد شد.

۲-۱- پایداری و تاب‌آوری در زنجیره تامین

در دنیای رقابتی کنونی، مفاهیم پایداری و تاب‌آوری به‌عنوان ارکان اساسی مدیریت زنجیره‌تامین و کسب‌وکار شناخته می‌شوند. زنجیره‌تامین پایدار بر دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تمرکز دارد، درحالی‌که تاب‌آوری مجموعه‌ای از راهبردها را شامل می‌شود که سازمان‌ها را در مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها و اختلالات محیطی توانمند می‌سازد و امکان بازگشت سریع به شرایط مطلوب را فراهم می‌کند [21]. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی با هدف ادغام این دو مفهوم در بخش‌های مختلف زنجیره‌تامین انجام شده است. در ادامه، مروری بر برجسته‌ترین پژوهش‌های مرتبط در این حوزه ارایه می‌گردد. در حوزه زنجیره‌تامین پایدار، علوی و همکاران [22] به بررسی مساله انتخاب تامین کننده با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و اقتصاد چرخشی در زنجیر هتامین پرداختند. در گام نخست، پژوهشگران معیارهای مرتبط با پایداری را از طریق بررسی ادبیات موجود و جمع‌آوری نظرات خبرگان در یکی از شرکت‌های هلدینگ پتروشیمی شناسایی کردند. سپس، سیستمی پشتیبان تصمیم طراحی شد که با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی، به تعیین وزن معیارها می‌پرداخت. در ادامه، پس از تعیین وزن هر یک از معیارها، تامین‌کنندگان بر اساس اولویت‌بندی حاصل از روش استنتاج فازی ارزیابی و رتبه‌بندی شدند.

در پژوهشی دیگر وو و همکاران [23] پژوهشگران رویکرد جدیدی برای انتخاب تامین‌کنندگان برتر در صنایع شیمیایی با توجه به سه بعد پایداری ارایه کردند. در این تحقیق، از روش‌های مختلف برای محاسبه وزن معیارها استفاده شد. به‌این‌ترتیب که وزن معیارهای اجتماعی با استفاده از روش تحلیل حالت شکست و اثرات، وزن معیارهای اقتصادی با روش تحلیل رابطه فازی خاکستری و وزن معیارهای زیست‌محیطی با بهره‌گیری از روش وزن آنتروپی تعیین گردید. سپس، برای تحلیل روابط میان معیارها، از روش دیمتل استفاده شد و در نهایت، برای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان، از روش تاپسیس بهره‌برداری شد.

همایونی و همکاران [24] یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه لجستیکی چند دوره‌ای پایدار در شرایط عدم قطعیت تصادفی ارایه کردند. به‌منظور مقابله با عدم قطعیت، از رویکرد برنامه‌ریزی استوار استفاده شد. برای حل مدل ریاضی پیشنهادی، پژوهشگران از یک روش ترکیبی بهره بردند که بر پایه برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای و یک روش ابتکاری طراحی شده بود.

بورکی و همکاران [25] به بررسی چگونگی ادغام تصمیمات طراحی محصول و مدیریت زنجیره‌تامین برای تسهیل گذار به سمت مدل‌های پایدارتر پرداخته‌اند. محققین با استفاده از تحلیل تماتیک بر داده‌های به‌دست‌آمده از ۱۵ مصاحبه نیمه‌ساختاریافته در نیوزیلند، چهار گزاره کلیدی را شناسایی کرده‌اند: «تفکر پایان عمر محصول در طراحی»، «زنجیره‌تامین چرخشی»، «نوآوری مدل کسب‌وکار» و «ارزش‌های سازمانی پایدار». نتایج نشان می‌دهد که ادغام تصمیمات طراحی محصول با مدیریت زنجیره‌تامین می‌تواند به شرکت‌ها کمک کند تا به‌سوی مدل‌های پایدارتر و چرخشی حرکت کنند. این ادغام چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مرتبط با مدل‌های سنتی خطی را کاهش می‌دهد و چارچوبی عملیاتی برای طراحان، مدیران و پژوهشگران فراهم می‌کند تا اهداف اقتصاد چرخشی را در سطح زنجیره‌تامین محقق سازند.

حیدری و همکاران، به بررسی راهکاری برای ایجاد زنجیره‌تامین پایدار پرداخته‌اند که به موضوعات مهمی نظیر کاهش منابع طبیعی، افزایش زباله‌های صنعتی و گرمایش زمین پاسخ دهد. آن‌ها مدلی دومرحله‌ای را معرفی کرده‌اند که در مرحله اول به تعیین قیمت بهینه محصولات برای تولیدکننده و خرده‌فروش پرداخته و در مرحله دوم از اوراق قرضه سبز برای تامین مالی زنجیره‌تامین پایدار استفاده می‌کند. هدف این مدل کاهش هزینه‌های تولیدکننده و رفع نیاز به بودجه اولیه است. برای حل این مساله از الگوریتم‌های تجزیه بندرز و متاهیورستیک استفاده‌شده و مثال‌های عددی برای نشان دادن قابلیت کاربردی مدل ارایه شده است. همچنین، مدل پیشنهادی با ارایه تخفیف‌ها، مشتریان را به خرید مجدد و بازیافت محصولات ترغیب می‌کند.

دلیکتاس و همکاران [26]، به تحلیل مسأله لجستیک پسماند در زنجیره‌تامین پایدار پرداختند. در این راستا، محققان یک مدل دومرحله‌ای تصادفی پیشنهاد کردند و سپس نسخه‌ای بهبودیافته از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای را برای حل مدل ارایه دادند. آن‌ها همچنین کارایی این روش را در حل مسایل پیچیده لجستیک پسماند به‌طور عملی نشان دادند.

در این راستا ژن و همکاران [27] مدلی با هدف طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار برای چند محصول در شرایط عدم قطعیت تصادفی ارایه کردند. در این مدل، تصمیمات استراتژیک مختلفی ازجمله مکان‌یابی تسهیلات و برنامه‌ریزی ظرفیت آن‌ها در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از روش لاگرانژ حل شد.

جیانگ و همکاران [28]، به‌طور سیستماتیک ادبیات موجود در زمینه پذیرش تکنولوژی دیجیتال برای مدیریت زنجیره‌تامین پایدار اجتماعی را موردبررسی قرار دادند و چارچوب نظری برای شفاف‌سازی مفاهیم کلیدی این حوزه ارایه کردند. در این مطالعه، برای تحلیل ۴۹ مقاله منتشرشده از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴، از رویکرد تحلیل محتوای سیستماتیک استفاده شد. نتایج این تحقیق شامل شناسایی عوامل پیش‌نیاز، موانع، شیوه‌ها، تسهیل‌کنندگان و نتایج پذیرش تکنولوژی دیجیتال در زنجیره‌تامین پایدار می‌باشد. مدل مفهومی پیشنهادی که بر اساس چارچوب تکنولوژی سازمان محیط و تئوری انتشار نوآوری طراحی شده است، روابط میان عوامل شناسایی‌شده را توضیح داده و دیدگاه‌هایی در مورد چگونگی حمایت از توسعه یک زنجیره‌تامین پایدار اجتماعی ارایه می‌دهد.

در پژوهشی دیگر، اسدی و همکاران [29] در مطالعه خود به طراحی شبکه زنجیره‌تامین سبز و پاسخگو با تحت عدم قطعیت تصادفی پرداختند. در این راستا، محققین یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه ارایه کرده و با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار با عدم قطعیت مساله مقابله کردند. همچنین به‌منظور حل مدل ارایه‌شده از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کردند.

ماستوس و همکاران [30]، مدلی را برای اندازه‌گیری و تحلیل روابط میان عوامل کلیدی، شیوه‌ها و عملکرد مدیریت زنجیره‌تامین پایدار در صنعت مواد غذایی ارایه دادند. در این پژوهش، محققان با انجام یک نظرسنجی از ۴۲۳ شرکت در صنعت مواد غذایی یونان، به این اهداف پرداخته‌اند. داده‌ها با استفاده از تحلیل عاملی اکتشافی، سپس تحلیل عاملی تأییدی و مدل‌سازی معادلات ساختاری برای بررسی روابط میان ساختارهای مدل تجزیه‌وتحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که «عوامل کلیدی پایداری در سطح شرکت» و «عوامل کلیدی پایداری در زنجیره تامین» به‌طور معناداری «همکاری در زنجیره تامین» و «گرایش استراتژیک زنجیره تامین» را تقویت می‌کنند. علاوه بر این، «گرایش استراتژیک زنجیره تامین» بر «عملکرد اجتماعی» و «عملکرد زیست‌محیطی» تاثیر مثبت دارد، درحالی‌که «همکاری در زنجیره تامین» بر «عملکرد اقتصادی» و «عملکرد زیست‌محیطی» تاثیر مثبت می‌گذارد؛ همچنین، «عملکرد اجتماعی» تاثیر مثبت و معناداری بر «عملکرد اقتصادی» دارد.

در حوزه زنجیره‌تامین تاب‌آور، حبیب و همکاران [31]، مدلی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین تاب‌آور در محیط‌های با عدم قطعیت شناختی ارایه دادند. در این مدل، محققان به‌طور هم‌زمان مقادیر بهینه تولید و توزیع را تعیین کرده و تصمیمات استراتژیک زنجیره‌تامین (مانند مکان‌یابی تسهیلات و تعیین ظرفیت آن‌ها با توجه به سناریوهای مختلف اختلالات) را موردبررسی قرار دادند. برای مقابله با عدم قطعیت، از روش بهینه‌سازی استوار فازی استفاده شد و برای حل این مساله، پژوهشگران از روش تعاملی بهره بردند.

در پژوهشی دیگر، لئونگ و همکاران [32]، مساله انتخاب تامین کنندگان تاب آور را در صنعت مواد غذایی موردمطالعه قرار دادند. در این راستا، محققین ابتدا معیارهای مرتبط با مساله تحقیق را با مطالعه ادبیات پژوهش شناسایی کرده و با استفاده از روش بهترین-بدترین، وزن معیارها و زیرمعیارها را محاسبه کردند. در گام بعد، تامین کنندگان بالقوه شناسایی‌شده و با استفاده از روش تاپسیس فازی اولو یت‌بندی شدند.

گلدبک و همکاران [33] به مطالعه مساله زنجیره‌تامین تاب‌آور با در نظر گرفتن عدم قطعیت تصادفی پرداختند. در این راستا، محققین یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه ارایه کردند و به‌منظور مقابله با عدم قطعیت از روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای استفاده کردند.

اوزوما و همکاران [34]، به بررسی نقش و اهمیت استراتژی‌های تاب‌آوری در زنجیره‌های تامین جهانی با در نظر گرفتن تاثیرات اقلیمی پرداخته‌اند. در این راستا محققین به‌طور سیستماتیک استراتژی‌هایی را برای شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها، تطبیق با شیوه‌های زنجیره‌تامین، ترویج همکاری میان ذینفعان و بهره‌برداری از حمایت‌های سیاستی و مقرراتی موردبررسی قرار دادند. نتایج تحقیق، چالش‌های مالی، فناوری و مقرراتی که مانع از پیاده‌سازی تاب‌آوری می‌شوند را برجسته کرده و بر تاثیر تشدیدکننده نابرابری‌های جهانی تاکید می‌کند. علاوه بر این، توصیه‌هایی برای کسب‌وکارها، سیاست‌گذاران و نهادهای بین‌المللی ارایه می‌دهد تا به اجرای موثر استراتژی‌های تاب‌آوری کمک کنند.

در پژوهشی دیگر، سینتی و همکاران [35]، به بررسی روش‌های افزایش تاب‌آوری شبکه‌های تامین در زمان بحران‌ها توسط شرکت‌ها پرداخته‌اند. در این پژوهش، محققان از طراحی مطالعه موردی چندگانه بهره برده و تعاملات درون شبکه‌های تامین شرکت‌ها را به‌طور جامع بررسی کرده‌اند تا بینش‌های جدیدی در مورد رویکردهای شبکه تامین و نحوه تقویت تاب‌آوری آن در برابر عدم‌قطعیت‌های جهانی به دست آورند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که شرکت‌ها چگونه تاب‌آوری شبکه تامین خود را در بحران‌های جهانی افزایش می‌دهند. این مطالعه با ارایه دیدگاه‌های نو ین در زمینه شبکه‌های تامین، اهمیت رویکرد شبکه تامین در زمان بحران‌های جهانی را برجسته کرده و به غنای درک شیوه‌های استراتژیک شرکت‌ها برای مقابله با عدم‌قطعیت‌های جهانی و حفظ تداوم زنجیره‌تامین کمک می‌کند.

همچنین، محققین پژوهش‌هایی را با در نظر گرفتن هم‌زمان مفاهیم پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تامین انجام داده‌اند. در این راستا گووینداِن و همکاران [36]، به طراحی شبکه زنجیره‌تامین معکوس در صنعت خودرو پرداختند. در این پژوهش محققین یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن استراتژی‌های پایداری و تاب‌آوری تحت عدم قطعیت ارایه کردند و از روش برنامه‌ریزی استوار سناریو محور به‌منظور مقابله با عدم قطعیت مساله و از نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم کراس انتروپی به‌منظور حل مدل استفاده کردند.

در پژوهشی دیگر، نیری و همکاران [37]، به مساله ارزیابی تامین کنندگان زنجیره‌تامین در صنعت پزشکی پرداختند. در این راستا، محققی یک رویکرد جدید داده محور ارایه کردند که استراتژی‌های تاب‌آوری، پایداری و پاسخگو یی را در مسایل زنجیره‌تامین لحاظ می‌کند. در رویکرد ارایه‌شده توسط محققین، پس از شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله تحقیق، نسخه بهبودیافته‌ای از روش بهترین بدترین تحت عنوان روش بهترین بدترین تصادفی به‌منظور محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها ارایه گردید.

در پژوهشی دیگر، بیات زاده و همکاران [38]، با بهره‌گیری از مفاهیم انقلاب صنعتی پنجم که به‌صورت هم‌زمان مفاهیم پایداری، تاب‌آوری و انسان‌محوری را در زنجیره‌های تامین در نظر دارد، به شناسایی و ارزیابی معیارهای انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور در صنعت فولاد پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش دلفی فازی و بهترین-بدترین فازی، اهمیت معیارهایی چون انسان‌محوری، همکاری انسان و ربات و فناوری‌های نو ین را برجسته ساختند.

اسدی و همکاران [39] یک مدل تصمیم‌گیری داده محور به‌منظور ارزیابی تامین کنندگان با در نظر گرفتن ابعاد انقلاب صنعتی پنجم و زنجیره‌تامین بادوام ارایه کردند. شایان‌ذکر است که مفاهیم انقلاب صنعتی پنجم و زنجیره‌تامین بادوام از مفاهیم نوظهور می‌باشند که هر دو این مفاهیم استراتژی‌های پایداری و تاب‌آوری را در مسایل زنجیره‌تامین لحاظ می‌کنند.

گوویندان و قلی زاده [36] مدلی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین معکوس با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و تاب‌آوری در صنعت خودرو تحت عدم قطعیت تصادفی ارایه کردند؛ همچنین برای مقابله با عدم قطعیت‌ها، محققین از رویکرد برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر سناریو بهره برده و جهت حل مدل پیشنهادی از نسخه بهبودیافته الگوریتم کراس آنتروپی استفاده کردند.

شبیر و همکاران [40] با ارایه یک مدل ریاضی به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن استراتژی‌های پایداری و تاب‌آوری در محیط عدم قطعیت تصادفی پرداختند. محققین برای ارزیابی عملکرد مدل ارایه‌شده یک از اطلاعات یک شرکت در حوزه صنعت خودروسازی استفاده کرده و با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو با عدم قطعیت مقابله و مدل پیشنهادی را با استفاده از روش لاگرانژ حل کردند.

در پژوهشی دیگر، فروزش و همکاران [41]، به تحلیل شبکه زنجیره‌تامین محصولات فسادپذیر پرداختند. در این راستا، محققین یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت شناختی در مسایل زنجیره‌تامین ارایه کردند. محققین از رویکرد بهینه‌سازی استواز فازی برای مقابله با عدم قطعیت و از روش محدودیت اپسیلون برای حل مدل ارایه‌شده استفاده کردند.

در پژوهشی دیگر، ولی سیار و همکاران [42]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار، تاب آور و پاسخگو تحت عدم قطعیت ارایه کردند. در این راستا محققین برای مقابله با عدم قطعیت از روش بهینه‌سازی استوار و از روش لاگرانژ به‌منظور حل مدل ریاضی استفاده کردند.

در حوزه صنعت داروسازی، کایانی و همکاران [43]، یک مدل تصمیم‌گیری ترکیبی (تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی و مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه) به‌منظور بهینه‌سازی زنجیره‌تامین دارو ارایه کردند. محققین در مدل ارایه‌شده معیارهای پایداری و تاب‌آوری شبکه زنجیره‌تامین را لحاظ کردند. این چارچوب با استفاده از داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از صنعت داروسازی پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که از میان معیارهای پایداری، قیمت محصول، سابقه کسب‌وکار، توانایی نوآوری و افشای اطلاعات به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیارها برای تصمیم‌گیرندگان در صنعت داروسازی شناخته شده‌اند.

در پژوهشی دیگر آگراول و همکاران [44]، یک رویکرد جدید تصمیم‌گیری به نام ارزیابی فازی مبتنی بر فاصله از راه‌حل میانگین (*F-EDAS*) به‌منظور ارزیابی تامین کنندگان در زنجیره‌تامین ارایه کردند. در این راستا محققین ابتدا معیارهای مرتبط با مساله تحقیق (معیار اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی و تاب‌وری) را شناسایی کرده و با استفاده از رویکرد ارایه‌شده وزن معیارها را محاسبه کردند. در گام بعد تامین کنندگان بالقوه را بر مبنای معیارهای مساله تحقیق مورد ارزیابی قرار دادند.

چاوونی بن عبدالله و همکارانش [45]، با در نظر گرفتن استراتژی‌های پایداری، تاب‌آوری و دیجیتالی‌سازی در زنجیره تامین، معیارهای اصلی مرتبط با این استراتژی‌ها را در انتخاب تامین‌کنندگان شناسایی کردند. این شناسایی با استفاده از پرسش‌نامه‌ای که به متخصصان در صنایع مختلف ارایه شده بود، انجام گرفت. در گام بعدی، برای تحلیل و اولویت‌بندی این معیارها، از مدل سلسله‌مراتبی تحلیلی استفاده شد. نتایج این پژوهش می‌تواند برای تصمیم‌گیران و محققان بسیار مفید باشد، زیرا ضمن شفاف‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری مبتنی بر معیارهای چندگانه، به بهبود عملکرد زنجیره‌تامین کمک شایانی می‌کند. برای درک بهتر، **جدول ۱** به طبقه‌بندی پژوهش‌های موردبررسی پرداخته است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده.

Table 1- Summary of the conducted research.

محقق	مدل ریاضی	پایداری	تاب‌آوری	عدم قطعیت			روش مقابله با عدم قطعیت	مطالعه موردی	روش حل
				تصادفی	شناختی	عمیق			
علوی و همکاران [22]	-	✓						هلدینگ پتروشیمی	بهترین-بدترین فازی/سیستم استنتاج فازی
وو و همکاران [23]	-	✓						صنایع شیمیایی	آنتروپی/دیمتل/تاپسیس
همایونی و همکاران [24]	دوهدفه	✓		✓			برنامه‌ریزی استوار	-	برنامه‌ریزی آرمانی
بورکی و همکاران [25]	-	✓						-	تحلیل تم
دلیکتاس و همکاران [26]	چند هدفه	✓		✓			برنامه‌ریزی تصادفی	-	برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای
ژن و همکاران [27]	دوهدفه	✓		✓			برنامه‌ریزی تصادفی	-	لاگرانژ
جیانگ و همکاران [28]	-	✓						-	تحلیل محتوای سیستماتیک
حبیب و همکاران [31]	چند هدفه		✓		✓		برنامه‌ریزی استوار فازی	-	روش تعاملی
لئونگ و همکاران [32]	-		✓					مواد غذایی	بهترین-بدترین/تاپسیس
گلدبک و همکاران [33]	تک هدفه		✓	✓			برنامه‌ریزی تصادفی	-	Gurobi 8.1
گووندان و همکاران [36]	چندهدفه	✓	✓		✓		برنامه‌ریزی استوار تصادفی	صنعت خودرو	الگوریتم کراس انتروپی
نیری و همکاران [37]	-	✓	✓					صنعت پزشکی	بهترین-بدترین تصادفی
شبیر و همکاران [40]	چندهدفه	✓	✓	✓			بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو	صنعت خودرو	آزادسازی لاگرانژ
فروزش و همکاران [41]	چندهدفه	✓	✓		✓		استوار فازی	صنعت پزشکی	محدودیت اپسیلون
ولی سیار و همکاران [42]	چندهدفه	✓	✓		✓		بهینه‌سازی استوار فازی	-	الگوریتم لاگرانژ
کایانی و همکاران [43]	چندهدفه	✓	✓					صنعت دارو	
آگراول و همکاران [44]	-	✓	✓					-	F-EDAS
چاوونی بن عبدالله و همکارانش [45]	-	✓	✓					-	سلسله‌مراتبی تحلیلی
تحقیق حاضر	چند هدفه	✓		✓	✓		بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی	صنعت خودرو	روش بهترین-بدترین تصادفی/ویکور تصادفی/برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت

۲-۲- شکاف‌های پژوهش و سهم پژوهش حاضر

با بررسی جامع و دقیق ادبیات پژوهش در حوزه زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور نشان‌دهنده آن است که علی‌رغم مطالعات گسترده‌ای که در این زمینه انجام‌شده، همچنان شکاف‌های قابل‌توجهی به‌ویژه در صنعت خودروسازی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیش‌تر و عمیق‌تر هستند.

یکی از مهم‌ترین این شکاف‌ها، کمبود مدل‌های جامع و چندهدفه‌ای است که قادر به یکپارچه‌سازی هم‌زمان سه بعد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) در کنار تقویت تاب‌آوری زنجیره‌تامین در شرایط عدم‌قطعیت بالا باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات پیشین اغلب به بررسی جداگانه این ابعاد پرداخته و یا تنها بر بخش خاصی از مفهوم تاب‌آوری، مانند سرعت بازیابی پس از اختلال، تمرکز کرده‌اند. این در حالی

است که زنجیره‌تامین در دنیای واقعی، مساله‌ای پیچیده و چندسطحی است که تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی در بازه‌های زمانی متفاوت را به‌صورت هم‌زمان در برمی‌گیرد؛ همچنین، مرور ادبیات نشان‌دهنده آن است که اگرچه برخی پژوهش‌ها به ادغام تصمیمات بلندمدت و میان‌مدت توجه داشته‌اند، ولی مطالعات جامع و دقیقی که تصمیمات متنوعی مانند انتخاب فناوری‌ها، انتخاب تامین‌کنندگان، تعیین شیوه‌های حمل‌ونقل، مکان‌یابی و ظرفیت‌گذاری تسهیلات را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کرده باشند، بسیار محدود بوده و نیاز به پژوهش‌های عمیق‌تر در این حوزه احساس می‌شود.

شکاف پژوهشی دوم مربوط به رویکرد مطالعات قبلی نسبت به مفهوم عدم‌قطعیت است. اغلب پژوهش‌ها یکی از انواع عدم‌قطعیت فازی یا تصادفی را به‌صورت مستقل مدنظر قرار داده‌اند. به‌عنوان نمونه، مطالعات حبیب و همکاران [31] صرفا به عدم‌قطعیت فازی و مطالعات گلدبک و همکاران [33] تنها به عدم‌قطعیت تصادفی توجه داشته‌اند. با این‌حال، شرایط واقعی صنعت خودروسازی معمولا با عدم‌قطعیت‌های ترکیبی (فازی-تصادفی) همراه است که در پژوهش حاضر برای نخستین بار از چنین رویکرد ترکیبی و نوآورانه‌ای استفاده شده است. این رویکرد قابلیت مدل‌سازی دقیق‌تر و انعطاف‌پذیرتر را فراهم می‌سازد.

سومین شکاف پژوهشی شناسایی‌شده مربوط به رویکردهای موجود در ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان است. مطالعات قبلی غالبا تامین‌کنندگان را به‌صورت تک‌بعدی و فقط از جنبه اقتصادی ارزیابی کرده‌اند (مانند مطالعه لئونگ و همکاران [32]). در این پژوهش برای نخستین بار از یک رویکرد ارزیابی چندمعیاره جامع استفاده‌شده که شامل دو روش نوآورانه تصمیم‌گیری، یعنی بهترین-بدترین فازی-تصادفی و ویکور تصادفی است. این رویکرد باعث می‌شود تا تامین‌کنندگان به‌صورت کامل و یکپارچه از منظر اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و تاب‌آوری ارزیابی شوند.

در پاسخ به این شکاف‌ها، پژوهش حاضر یک چارچوب تصمیم‌گیری دومرحله‌ای نوآورانه ارایه می‌دهد که از ترکیب سه روش پیشرفته تشکیل‌شده است. در مرحله اول، وزن‌دهی معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی صورت گرفته است که قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های محیطی را با سه سناریوی خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه دارد. سپس در همان مرحله از روش ویکور تصادفی برای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان استفاده شده است. در مرحله دوم، یک مدل ریاضی چندهدفه فازی-تصادفی توسعه داده‌شده که پنج هدف کلیدی شامل کمینه‌سازی هزینه، کاهش انتشار آلاینده‌ها، حداکثرسازی بینایی زنجیره‌تامین، کاهش پیچیدگی گره‌ها و افزایش امتیاز تامین‌کنندگان را در شرایط واقعی و پیچیده صنعت خودرو به‌صورت هم‌زمان بهینه‌سازی می‌کند.

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج آن با یک مدل مرجع قطعی مقایسه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد مدل پیشنهادی باعث کاهش حدود ۱۸% در هزینه‌های زنجیره‌تامین، بهبود ۳۰% سطح بینایی زنجیره و افزایش ۱۹% امتیاز تامین‌کنندگان شده است. علاوه بر این، شاخص عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی نیز به‌طور متوسط پانزده درصد بهبود یافته است. نتایج حاصل در تمامی سناریوهای تعریف‌شده از ثبات و پایداری عددی مناسبی برخوردار بوده و انحراف در نتایج اهداف اصلی کم‌تر از ۱۰% بوده است؛ همچنین، این پژوهش برای نخستین بار شاخص‌هایی هم‌چون پیچیدگی گره‌ها، ظرفیت مازاد، سیستم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات و بینایی زنجیره را در کنار اهداف متداول اقتصادی و زیست‌محیطی در یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه گنجانده است. این خصوصیات، مدل پیشنهادی را به ابزاری قدرتمند و کاربردی برای تصمیم‌گیری مدیران در زنجیره‌های‌تامین پیچیده و پرمخاطره تبدیل کرده است.

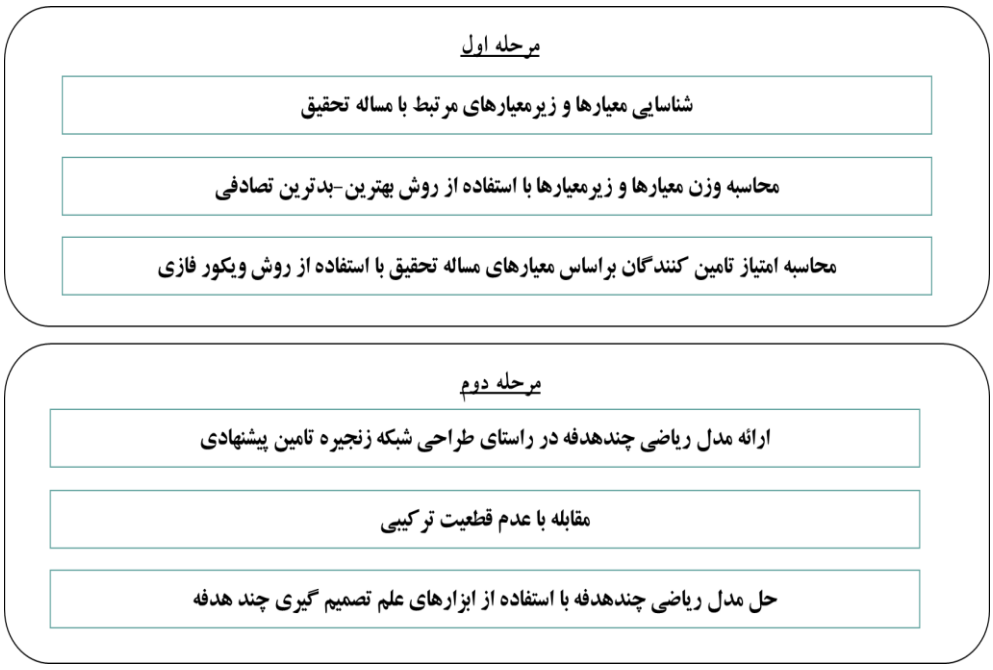
به‌صورت کلی، تمایز پژوهش حاضر با مطالعات پیشین را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

۱. استفاده از عدم قطعیت ترکیبی (فازی-تصادفی) به‌جای رویکردهای تک‌بعدی (فازی یا تصادفی).
۲. طراحی فرآیند ارزیابی دومرحله‌ای برای تامین‌کنندگان با بهره‌گیری از روش‌های بهترین-بدترین فازی-تصادفی و ویکور تصادفی به‌جای رویکردهای تک‌مرحله‌ای.
۳. لحاظ هم‌زمان ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و تاب‌آوری در مدل پیشنهادی.
۴. ساختار تصمیم‌گیری چندسطحی شامل تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی به‌صورت یکپارچه.
۵. رویکرد حل مساله نوآورانه با استفاده از بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت به‌جای مدل‌های ساده‌تر و سنتی‌تر است.

۳- روش تحقیق

همان‌طور که در ابتدای پژوهش بیان شد، این تحقیق به دنبال مدل‌سازی چند هدفه زنجیره‌تامین پایدار با در نظر گرفتن استراتژی‌های تاب‌آوری در صنعت خودرو می‌باشد. در این راستا، یک مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای ارایه خواهد شد که در مرحله اول، به‌منظور محاسبه امتیاز تامین‌کنندگان، ابتدا معیارهای مرتبط با مساله تحقیق با مطالعه ادبیات پژوهش و نظرات خبرگان شناسایی‌شده و با استفاده تکنیک بهترین-بدترین تصادفی وزن دهی می‌گردند.

سپس، امتیاز تامین‌کنندگان بالقوه بر مبنای معیارهای مساله تحقیق و با استفاده از روش ویکور تصادفی محاسبه می‌گردد. در گام دوم نیز یک مدل چندهدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار با در نظر گرفتن استراتژی‌های تاب‌آوری تحت عدم قطعیت فازی-تصادفی ارایه می‌گردد. در ادامه به‌منظور مقابله با عدم قطعیت از روش بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی و به‌منظور حل مدل ارایه‌شده از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت استفاده می‌شود. **شکل ۱** شمای کلی مراحل انجام پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.


مرحله اول
شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله تحقیق
محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین تصادفی
محاسبه امتیاز تامین کنندگان براساس معیارهای مساله تحقیق با استفاده از روش ویکور فازی
مرحله دوم
ارائه مدل ریاضی چندهدفه در راستای طراحی شبکه زنجیره تامین پیشنهادی
مقابله با عدم قطعیت ترکیبی
حل مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از ابزارهای علم تصمیم گیری چند هدفه

شکل ۱- چارچوب تحقیق.

Figure 1- The research framework.

۱-۳- روش بهترین بدترین تصادفی

یکی از روش‌های پرکاربرد در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره برای محاسبه وزن معیارها، روش بهترین-بدترین است که بر مبنای مقایسات زوجی طراحی شده است. این روش، برخلاف سایر تکنیک‌های مشابه نظیر تحلیل سلسله‌مراتبی، به‌جای انجام مقایسات زوجی میان تمامی شاخص‌ها، ابتدا بهترین و بدترین شاخص را تعیین کرده و سپس سایر شاخص‌ها تنها با این دو مقایسه می‌شوند [46]. این رویکرد منجر به کاهش چشمگیر تعداد مقایسات زوجی می‌شود. روش سنتی بهترین-بدترین با رویکردی قطعی به مقایسات زوجی پرداخته و تمامی آن‌ها را به‌صورت دقیق در نظر می‌گیرد. این ویژگی می‌تواند در محیط‌هایی که با نوسانات و عدم قطعیت قابل‌توجه همراه هستند، موجب کاهش اثربخشی این روش شود.

برای رفع این محدودیت، پژوهشگران نسخه‌های متنوعی از این روش را برای مواجهه با شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند، ازجمله نسخه‌های فازی، خاکستری و راف [37]، [47]، [48]. علاوه بر این، روش بهترین-بدترین با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بهبود یافته است که شامل روش‌هایی نظیر بهترین-بدترین تصادفی و بهترین-بدترین فازی تصادفی می‌شود [49]. در این پژوهش، وزن‌دهی معیارها بر اساس روش بهترین-بدترین تصادفی صورت گرفته است که نسخه‌ای سناریومحور از روش بهترین-بدترین به شمار می‌رود [50]. در این مدل، پس از شناسایی معیارهای بهترین و بدترین، بردارهای مقایسات زوجی با توجه به سناریوهای متنوع (نظیر سناریوهای بدبینانه، خوش‌بینانه و محتمل) و بدون در نظر گرفتن طیف

عددی و بر مبنای مقیاس موردنظر (به‌عنوان‌مثال اعداد یک تا نه) تدوین می‌شوند در گام بعد، در ادامه، با بهره‌گیری از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مبتنی بر سناریو که جزییات آن در فایل پیوست ارایه خواهد شد.

۲-۳- روش ویکور تصادفی

روش ویکور یک تکنیک بهینه‌سازی چندمعیاره و مبتنی بر اجماع است. این روش در ابتدا توسط آپریکوویچ در سال ۱۹۹۸ معرفی شد تا مسایل تصمیم‌گیری چندمعیاره را حل کرده و بهترین راه‌حل ممکن را ارایه دهد. در این روش، گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های مختلف رتبه‌بندی و انتخاب می‌شوند. هدف اصلی روش ویکور، نزدیک کردن اکثر گزینه‌ها به پاسخ ایده‌آل در هر شاخص است تا گزینه‌ها بر اساس این هدف رتبه‌بندی شوند [51].

روش‌های مختلفی برای ویکور ارایه شده است، مانند ویکور فازی، ویکور خاکستری و نمونه‌های مختلف دیگر. در این پژوهش، برای روش ویکور تصادفی ارایه می‌شود که در آن سناریوهای مختلفی طراحی می‌شوند که هر یک وزن مشخصی دارند و بر اساس این سناریوها، وزن نهایی گزینه‌ها تعیین می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، انتخاب گزینه بهینه بر اساس شرایط و سناریوهای مختلف پیش رو انجام‌شده و از این طریق به پاسخ بهینه در دنیای واقعی نزدیک‌تر خواهیم شد. مراحل روش ویکور تصادفی در فایل پیوست ارایه شده است.

۳-۳- مدل ریاضی چند هدفه

در این قسمت یک مدل چندهدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار با در نظر گرفتن استراتژی‌های تاب‌آوری تحت عدم قطعیت فازی-تصادفی ارایه می‌گردد. در این راستا، زنجیره‌تامین پیشنهادی شامل چهار سطح است که عبارت‌اند از تامین‌کنندگان یعنی تامین‌کنندگان پشتیبان[1] و تامین‌کنندگان اولیه[2]، سایت‌های تولید[3]، مراکز توزیع[4] و نقاط تقاضا[5]. در این زنجیره تامین، مواد اولیه[6] از *PSs* یا *BSs* تهیه‌شده و در فرآیند تولید مورداستفاده قرار می‌گیرند. درصورتی‌که *PS* نتواند مواد اولیه را تامین کند، *BSs* برای تامین مواد موردنیاز انتخاب می‌شوند. سپس، مواد اولیه برای تولید محصولات در *MSs* به کار می‌روند. محصولات تولیدشده به *DCs* ارسال می‌شوند تا نیاز مناطق مشتریان را برآورده کنند.

برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین موردنظر، مدلی ریاضی چند هدفه فازی مبتنی بر سناریو پیشنهاد شده است که در آن ابعاد پایداری و تاب‌آوری زنجیره‌تامین در نظر گرفته شده‌اند. در این راستا، مفهوم پایداری از طریق بررسی ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی موردتوجه قرار گرفته است. در این زمینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان یک مولفه مهم در ستون‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است [29]، [52]. علاوه بر این، هزینه‌های زنجیره‌تامین شامل هزینه‌های ثابت، خرید، تولید، عملیات، حمل‌ونقل و کمبود به‌عنوان ابعاد اقتصادی لحاظ شده‌اند [53].

همچنین، فرصت‌های شغلی ایجادشده توسط *PSs*، *BSs*، *MSs* و *DCs* به‌عنوان بخشی از ابعاد اجتماعی موردتوجه قرار گرفته‌اند. از سو یی دیگر، مفهوم تاب‌آوری از طریق در نظر گرفتن ظرفیت اضافی، تامین کنندگان پشتیبان [54]، سناریوهای اختلال در ظرفیت تسهیلات [55]، پیچیدگی گره‌ها و احداث سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات که باعث افزایش بینایی و کاهش ریسک و اختلالات در زنجیره‌تامین می‌شود [56]. همچنین در این تحقیق از روش‌های مختلف حمل‌ونقل (*TMs*) استفاده شده است که هرکدام هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خاص خود را دارند.

در این راستا، ابتدا شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مرتبط با مدل تعریف و تشریح می‌شوند. در ادامه، مساله تحقیق به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه تدوین و ارایه خواهد شد.

---

[1] Backing Suppliers (BSs)
[2] Primary Suppliers (PSs)
[3] Manufacturing sites (MSs)
[4] Distribution Centers (DCs)
[5] Demand Points (DPs)
[6] Raw Materials (RMs)

جدول ۲- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

Table 2- Sets, parameters and variables.

اندیس‌ها	
I	تامین‌کنندگان اولیه.
b	تامین‌کنندگان پشتیبان.
j	مراکز تولید.
k	مراکز توزیع.
c	مشتریان.
r	مواد اولیه.
q	وسایل نقلیه.
f	اندیس سیستم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات.
s	اندیس سناریوها.
پارامترهای پایداری	
پارامترهای مربوط به معیار اقتصادی	
$\widetilde{FOS}_i$	هزینه ثابت انعقاد قرارداد با تامین‌کننده اصلی i.
$\widetilde{FOB}_b$	هزینه ثابت انعقاد قرارداد با تامین‌کننده پشتیبان b.
$\widetilde{FOM}_j$	هزینه‌های ثابت مربوط به ساخت یا تأسیس مرکز تولیدی j.
$\widetilde{FOD}_k$	هزینه‌های ثابت مرتبط با ساخت مرکز توزیع k.
$\widetilde{PCR}_{ri}$	هزینه خرید از تامین‌کننده اصلی i (به ازای هر واحد ماده اولیه r).
$\widetilde{BCR}_{rb}$	هزینه خرید از تامین‌کننده پشتیبان b (به ازای هر واحد ماده اولیه r).
$\widetilde{MC}_j$	هزینه‌های تولید محصولات در مرکز تولیدی مشخص j.
$\widetilde{OC}_k$	هزینه‌های مرتبط با عملیات توزیع کالا از مرکز توزیع k.
$\widetilde{TC}_q$	هزینه جابجایی با وسیله نقلیه q بین نقاط مختلف زنجیره تامین.
$\widetilde{Sh}_c$	هزینه ناشی از عدم تامین کالا (کمبود) برای مشتری c.
پارامترهای زیست‌محیطی	
$\widetilde{EM}_j$	میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در مرکز تولید j.
$\widetilde{ET}_q$	میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط وسیله نقلیه q.
پارامترهای اجتماعی	
$\widetilde{JOP}_i$	فرصت‌های شغل ایجادشده ناشی از همکاری با تامین‌کننده اصلی i.
$\widetilde{JOB}_b$	فرصت‌های شغل ایجادشده ناشی از همکاری با تامین‌کننده پشتیبان b.
$\widetilde{JOM}_j$	فرصت‌های شغل ایجادشده ناشی از احداث مرکز تولید j.
$\widetilde{JOD}_k$	فرصت‌های شغل ایجادشده ناشی از احداث مرکز توزیع k.
پارامترهای تاب‌آوری	
$\widetilde{MEC}_j$	هزینه مرتبط با ایجاد ظرفیت مازاد در مرکز تولید j.
$\widetilde{DEC}_k$	هزینه مرتبط با ایجاد ظرفیت مازاد در مرکز توزیع k .
∂_{es}	درصد ظرفیت مختل شده برای تسهیل e در سناریو s.
TA_{eeq}	پارامتر باینری (درصورتی‌که وسیله نقلیه q بین نقاط e و e قابل‌استفاده باشد، در غیر این‌صورت برابر با صفر است).
$\widetilde{FOI}_f$	هزینه راه‌اندازی سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات f.
IE_{fs}	مجموع اطلاعات تبادل شده توسط سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات f در سناریو s.
سایر پارامترها	
α	سطح سرویس برای نقطه تقاضا c.
$\widetilde{TT}_q$	متوسط زمان موردنیاز برای حمل‌ونقل q توسط وسیله نقلیه (H\Kg-Km).
$\widetilde{ST}_i$	متوسط زمان موردنیاز برای تحویل مواد اولیه از تامین‌کننده اصلی i.
$\widetilde{BT}_b$	متوسط زمان موردنیاز برای تحویل مواد اولیه از تامین‌کننده پشتیبان b.
$Pcap_{ri}$	ظرفیت تامین‌کننده اصلی i در تامین ماده اولیه r.

جدول ۲- ادامه.

Table 2- Continued.

سایر پارامترها	
$Bcap_{rb}$	ظرفیت تامین‌کننده پشتیبان b در تامین ماده اولیه r.
$Mcap_j$	ظرفیت مرکز تولید j.
$Dcap_k$	ظرفیت مرکز توزیع k.
$\widetilde{Dem}_{cs}$	میزان تقاضا برای نقطه تقاضا c در سناریو s.
Dis_{ee}	فاصله بین دو تسهیل در زنجیره e و e'.
av_r	درصد مصرف از ماده اولیه r برای تولید محصول.
wi	وزن سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات.
we	وزن معیار زیست‌محیطی.
ws	وزن معیار اجتماعی.
سایر پارامترها	
wn	وزن معیار پیچیدگی گره‌ها.
Ps_s	احتمال رخداد سناریو s.
BigM	عدد مثبت بسیار بزرگ.
متغیرهای تصمیم	
ZP_i	متغیر باینری انتخاب تامین کننده اصلی i (در صورت انتخاب برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰).
ZB_b	متغیر باینری انتخاب تامین کننده پشتیبان b (در صورت انتخاب برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰).
ZM_j	متغیر باینری احداث مرکز تولید j (در صورت احداث برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰).
ZD_k	متغیر باینری احداث مرکز توزیع k (در صورت احداث برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰).
ZI_f	متغیر باینری راه‌اندازی سیستم اشتراک‌گذاری f (در صورت احداث برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰).
TQ_{eeq}	متغیر باینری استفاده از وسیله نقلیه q بین تسهیلات در صورت احداث برابر مقدار ۱، در غیر این صورت برابر با مقدار ۰.
RSM_{rijqs}	میزان ارسال ماده اولیه r از تامین‌کننده اصلی i به مرکز تولید j با وسیله نقلیه q در سناریو s.
RBM_{rbjqs}	میزان ارسال ماده اولیه r از تامین‌کننده پشتیبان b به مرکز تولید j با وسیله نقلیه q در سناریو s.
QMD_{jkqs}	میزان ارسال محصول از مرکز تولید j به مرکز توزیع k با وسیله نقلیه q در سناریو s.
QDC_{kcqs}	میزان ارسال محصول از مرکز توزیع k به مشتری c با وسیله نقلیه q در سناریو s.
VIS_{fs}	میزان بینایی ایجادشده با راه‌اندازی سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات f در زنجیره‌تامین تحت سناریو s.
QSC_{cs}	مقدار کمبود کالا برای مشتری c در سناریو s.
NC	پیچیدگی گره در زنجیره تامین.
ECM_{js}	ظرفیت مازاد ایجادشده در مرکز تولید j.
ECD_{ks}	ظرفیت مازاد ایجادشده در مرکز توزیع k.

با توجه به موارد ذکرشده، مدل پیشنهادی دارای پنج هدف به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}\text{minimize } Z1 = &\sum_i \widetilde{FOS}_i\ ZP_i + \sum_b \widetilde{FOB}_b\ ZB_b + \sum_j \widetilde{FOM}_j\ ZM_j + \sum_k \widetilde{FOD}_k\ ZD_k \\ &+ \sum_f \widetilde{FOI}_f\ Zf_f \\ &+ \sum_s Ps_s \left(\sum_{r,i,j,q} \widetilde{PCR}_{ri}\, RSM_{rijqs} + \sum_{r,b,j,q} \widetilde{BCR}_{rb}\, RBM_{rbjqs} + \sum_{j,k,q} \widetilde{MC}_j\, QMD_{jkqs} + \sum_{k,c,o,q} \widetilde{OC}_k QDC_{kcqs} \right. \\ &+ \sum_c \widetilde{Sh}_c\, QSC_{cs} + \sum_j \widetilde{MEC}_j\, ECM_{js} + \sum_k \widetilde{DEC}_k\, ECD_{ks} \\ &+ \sum_q \widetilde{TC}_q \left(\sum_{r,i,j} Dis_{ij}\, RSM_{rijqs} + \sum_{r,b,j} Dis_{bj}\, RBM_{rbjqs} + \sum_{j,k} Dis_{jk}\, QMD_{jkqs} \right. \\ &\left. \left. + \sum_{k,c} Dis_{kc}\, QDC_{kcqs} \right) \right)\end{aligned} \tag{۱}$$

$$\begin{aligned}&\text{minimize } Z2 \\ &= we \times \left[\sum_s \frac{Ps_s \left(\sum_{j,k,q} \widetilde{EM}_j\, QMD_{jkqs} + \sum_q \widetilde{ET}_q \left(\begin{array}{l} \sum_{r,i,j} Dis_{ij}\, RSM_{rijqs} + \\ \sum_{r,b,j} Dis_{bj}\, RBM_{rbjqs} + \\ \sum_{j,k} Dis_{jk}\, QMD_{jkqs} + \\ \sum_{k,c} Dis_{kc}\, QDO_{kcqs} \end{array} \right) - MinEi \right)}{MaxEi - MinEi} \right]\end{aligned} \tag{۲}$$

$$\begin{aligned}&+ws \times \left[\frac{MaxSoc - \left(\sum_i \widetilde{JOP}_i\ ZP_i + \sum_b \widetilde{JOB}_b\ ZB_b + \sum_j \widetilde{JOM}_j\ ZM_j + \sum_k \widetilde{JOD}_k\ ZD_k \right)}{MaxSoc - MinSoc} \right] \\ &+ws \times \left[\frac{MaxSoc - \left(\sum_i \widetilde{JOP}_i\ ZP_i + \sum_b \widetilde{JOB}_b\ ZB_b + \sum_j \widetilde{JOM}_j\ ZM_j + \sum_k \widetilde{JOD}_k\ ZD_k \right)}{MaxSoc - MinSoc} \right].\end{aligned} \tag{۳}$$

$$\begin{aligned}\text{Minimize } Z4 = &\sum_i \widetilde{ST}_i\ ZP_i + \sum_b \widetilde{BT}_b\ ZB_b \\ &+ \sum_{q,s} PS_s\, \widetilde{TT}_q \left(\sum_{r,i,j} Dis_{ij}\ RSM_{rijqs} + \sum_{r,b,j} Dis_{bj}\ RBM_{rbjqs} \right. \\ &\left. + \sum_{j,k} Dis_{jk}\ QMD_{jkqs} + \sum_{k,c} Dis_{kc}\ QDC_{kcqs} \right),\end{aligned} \tag{۴}$$

$$\text{maximize } Z5 = \sum_i VS_i\ ZP_i + \sum_b VB_b\ ZB_b. \tag{۵}$$

در مدل‌بالا معادله تابع هدف اول **معادله (۱)** با هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های زنجیره‌تامین تعریف شده است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های قرارداد با *PSs* و*BSs* ، هزینه‌های تاسیس *MSs*، *DCs*، سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات، ظرفیت اضافی در *MSs* و *DSs*، هزینه خرید تامین‌کنندگان، هزینه‌های تولید، عملیات، کمبود و حمل‌ونقل هستند.

تابع هدف دوم **معادله (۲)** تلاش می‌کند تا کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را به حداقل برساند و هم‌زمان منافع اجتماعی را به حداکثر برساند. در این معادله، *MaxEi* راه‌حل ایده‌آل مثبت (*PIS*) برای هدف زیست‌محیطی است که حداقل مقدار ممکن برای تاثیرات زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

همچنین $MinEi$ راه‌حل ایده‌آل منفی (NIS) است که بیش‌ترین مقدار تاثیرات زیست‌محیطی را مشخص می‌کند. به همین ترتیب، $MaxSoc$ و $MinSoc$ نیز به ترتیب راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی برای هدف اجتماعی است که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ممکن منافع اجتماعی را نشان می‌دهد.

تابع هدف سوم، **معادله (۳)** با هدف حداکثرسازی بینایی زنجیره‌تامین و حداقل‌سازی پیچیدگی گره‌ها تعریف شده است. در این معادله نیز $MaxV$ و $MinV$ به ترتیب راه‌حل ایده آل مثبت برای بخش بینایی شبکه زنجیره‌تامین و $MinNC$ و $MaxNC$ به ترتیب راه‌حل ایده آل مثبت برای بخش پیچیدگی گره شبکه زنجیره‌تامین می‌باشد. تابع هدف چهارم، **معادله (۴)** کل زمان زنجیره‌تامین را به حداقل می‌رساند.

تابع هدف پنجم، **معادله (۵)** امتیاز تامین‌کنندگان را که در مرحله قبل با توجه به معیارهای پایداری و تاب‌آوری کسب‌شده بود، به حداکثر می‌رساند.

۴-۳- محدودیت‌های مدل ارایه‌شده

۴-۳-۱- محدودیت‌های مرتبط با تعادل جریان

معادله (۶)، مقدار مواد اولیه ارسالی از تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان به مراکز تولیدی را محاسبه می‌کند. همچنین **معادله (۷)** و **معادله (۸)** نیز به ترتیب مقدار محصول ارسال‌شده از مراکز تولید به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به سمت مشتریان را محاسبه می‌کنند.

$$\left(\sum_{i,q} RSM_{rijqs} + \sum_{b,q} RBM_{rbjqs}\right) \times \left(\left(1-\sigma 1\right) ZT_j\right) + \left(1-\sigma 2\right)\left(1-ZT_j\right)\Big) = \sum_{k,q} ur_r\, QMD_{jkqs}, \; for\ all\ s,r,j, \tag{۶}$$

$$\sum_{j,q} QMD_{jkqs} = \sum_{q,c} QDC_{kcqs}, \; for\ all\ \ s,k, \tag{۷}$$

$$\sum_{k,q} QDC_{kcqs} + QSC_{cs} \geq \widetilde{Dem}_{cs}, \; for\ all\ c,s. \tag{۸}$$

۴-۳-۲- محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت

$$\sum_{j,q} RSM_{rijqs} \leq \ 1-\partial_{is})\ \ Pcap_{ri}\, ZP_i, \; for\ all\ r,i,s, \tag{۹}$$

$$\sum_{j,q} RBM_{rbjqs} \leq \ Bcap_{rb}\, ZB_b, \; for\ all\ r,b,s, \tag{۱۰}$$

$$\sum_{k,q} QMD_{jkqs} \leq \left(1-\partial_{js}\right) Mcap_j\, ZM_j, \; for\ all\ j,s, \tag{۱۱}$$

$$\sum_{c,q} QDC_{kcqs} \leq \ 1-\partial_{ks})\ Dcap_k\, ZD_k, \; for\ all\ k,s, \tag{۱۲}$$

۴-۳-۳- محدودیت مرتبط با سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات

$$VIS_{fs} = \left(1-\partial_{fs}\right) IE_{fs}\, ZI_f, \; for\ all\ f,s, \tag{۱۳}$$

$$\sum_{f} ZI_f = 1, \tag{۱۴}$$

محدودیت‌های (۱۳) میزان بینایی شبکه زنجیره‌تامین ناشی از استقرار سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات نشان می‌دهد. همچنین **محدودیت (۱۴)** نشان می‌دهد که سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات در زنجیره‌تامین باید مستقر شود.

۴-۴-۳- محدودیت مرتبط با میزان پیچیدگی گره

$$NC = \sum_i ZP_i + \sum_b ZB_b + \sum_j ZP_j + \sum_k ZD_k, \quad (۱۵)$$

محدودیت (۱۵) پیچیدگی گره‌ها در زنجیره‌تامین را محاسبه می‌کند.

سایر محدودیت‌ها

$$\frac{\sum_{k,c,q,s} QDC_{kcqs}}{\sum_{c,s} \widetilde{Dem}_{cs}} \geq \alpha. \quad (۱۶)$$

$$TQ_{ijq} \leq ZP_i.TA_{ijq}, for\ all\ i,j,q. \quad (۱۷)$$

$$TQ_{bjq} \leq ZB_b.\ TA_{bjq}, for\ all\ b,j,q. \quad (۱۸)$$

$$TQ_{jkq} \leq ZM_j.\ TA_{jkq}, for\ all\ \ j,k,q. \quad (۱۹)$$

$$TQ_{jkq} \leq ZD_k.\ TA_{jkq}, for\ all\ j,k,q. \quad (۲۰)$$

$$TQ_{kcq} \leq ZD_k.\ TA_{kcq}, for\ all\ k,c,q. \quad (۲۱)$$

$$TQ_{koq} \leq ZD_k\ \ TA_{koq}, for\ all\ k,o,q. \quad (۲۲)$$

$$RSM_{rijqs} \leq BigM\ TQ_{ijq}, for\ all\ r,i,j,q,s. \quad (۲۳)$$

$$RBM_{rbjqs} \leq BigM\ TQ_{bjq}, for\ all\ r,b,j,q,s. \quad (۲۴)$$

$$QMD_{jkqs} \leq BigM\ TQ_{jkq}, for\ all\ j,k,q,s. \quad (۲۵)$$

$$QDC_{kcqs} \leq BigM\ TQ_{kcq}, for\ all\ k,c,q,s. \quad (۲۶)$$

$$QDO_{koqs} \leq BigM\ TQ_{koq}, for\ all\ k,o,q,s. \quad (۲۷)$$

$$XS_i, XM_{jt}, ZSM_{ijm}, ZMD_{jkm} \in \quad (۲۸)$$

$$\{0,1\};\ QSM_{rijms}, QMC_{jktms}, B_{ks}, EXC_{js} \geq 0\ , for\ all\ m,t,j,k,s,r.$$

محدودیت (۱۶)، حداقل سطح سرویس‌دهی به مشتریان را نشان می‌دهد. **محدودیت (۱۷)** تا **محدودیت (۲۲)**، ارتباط بین تصمیمات مکانی و حمل‌ونقل را با استفاده از متغیرهای دودویی نشان می‌دهند. **محدودیت (۲۳)** تا **محدودیت (۲۷)** نیز مشخص می‌کنند که مواد و محصولات فقط در صورتی می‌توانند توسط روش حمل‌ونقل q منتقل شوند که آن روش انتخاب شده باشد. همچنین **محدودیت (۲۸)**، محدوده متغیرها را نشان می‌دهد.

۴-۳- روش بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی

عدم‌قطعیت یکی از چالش‌های اساسی در محیط کسب‌وکار است. نادیده‌گرفتن عدم‌قطعیت در مرحله برنامه‌ریزی می‌تواند منجر به نتایجی غیرواقعی شود که ممکن است زیان‌های قابل‌توجهی به همراه داشته باشد [24]، [29]. در این زمینه، شیوع بیماری کرونا به‌عنوان یک بحران جهانی، سطح بالایی از عدم‌قطعیت را در زنجیره‌های تامین و کسب‌وکارها ایجاد کرده است و موجب شده است تا توجه پژوهشگران به موضوع عدم‌قطعیت ترکیبی معطوف گردد. از این‌رو، پژوهش حاضر تلاش دارد تا مساله تحقیق را با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت فازی-تصادفی موردبررسی قرار دهد و با

شبیه‌سازی شرایط واقعی‌تر، به راه‌حل‌هایی کاربردی‌تر و قابل‌اتکاتر دست یابد. هدف از این رویکرد، افزایش توان مدل در مواجهه با سطوح بالای عدم‌قطعیت و ارایه تصمیماتی موثرتر برای مدیریت زنجیره‌تامین در شرایط بحرانی است.

در این راستا، در این پژوهش از رویکرد برنامه‌ریزی استوار فازی-تصادفی به‌منظور مقابله با عدم قطعیت مساله استفاده شده است که یک روش محبوب در ادبیات تحقیق بوده و عملکرد مناسبی را نشان داده است [24]، [57]، [58]. توضیحات تکمیلی روش برنامه‌ریزی استوار فازی تصادفی و نسخه متناظر آن برای مدل پیشنهادی در پیوست ارایه شده است.

۵-۳- روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت

برنامه‌ریزی آرمانی یکی از توسعه‌های برنامه‌ریزی خطی است که برای مدیریت اهداف چندگانه و اغلب متضاد طراحی شده است. این روش در سناریوهای تصمیم‌گیری که نیاز به برآورده‌سازی هم‌زمان اهداف مختلف وجود دارد، بسیار کاربردی است. در ادبیات تحقیق، نسخه‌های توسعه‌یافته متعددی از این روش ارایه شده است [61-59]. یکی از نسخه‌های کارآمد در ادبیات تحقیق که عملکرد مناسبی از خود نشان داده است، روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح شده است که مزایای متعددی ازجمله در نظر گرفتن چندین نقطه آرمانی، وزن‌دهی به توابع هدف و کاهش پیچیدگی نسبت به نسخه‌های سنتی دارد.

چانگ [35] در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۱ بیان کرد که روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده توانایی در نظر گرفتن اولویت‌های تصمیم‌گیرندگان را ندارد؛ بنابراین، به‌منظور رفع این محدودیت، تابع مطلوبیت را به مدل قبلی افزود تا مطلوبیت مورد انتظار تصمیم‌گیرندگان به حداکثر برسد. مدل اصلاح‌شده در فایل پیوست ارایه شده است.

۴- مطالعه موردی

در این پژوهش، مساله زنجیره‌تامین شرکت سایپا کاشان، به‌عنوان یکی از شرکت‌های برجسته در صنعت خودروسازی کشور، موردبررسی قرار گرفته است. ویژگی‌ها و مشخصات کارشناسانی که در فرآیند جمع‌آوری داده‌ها همکاری داشته‌اند، در **جدول ۳** ارایه شده است. این کارشناسان با تکمیل پرسشنامه‌های مربوطه، در فرایند گردآوری داده‌ها مشارکت داشته‌اند. پس از گردآوری داده‌ها، میانگین پاسخ‌های ارایه‌شده محاسبه‌شده و به‌عنوان ورودی در اجرای روش تحقیق به‌کار گرفته شده است. در این پژوهش، شاخص‌های اصلی در سه بعد کلیدی، شامل معیارهای عمومی، پایداری و تاب‌آوری، متناسب با ماهیت مساله تحقیق شناسایی و تحلیل شده‌اند. شرح تفصیلی این شاخص‌ها در **جدول ۴** تا **جدول ۶** ارایه گردیده است.

جدول ۳- اطلاعات کارشناسان.

Table 3- Expert information.

رده‌بندی شغلی	سابقه کاری	تحصیلات
مدیر تولید	7	دکتری مدیریت صنعتی
کارشناس تحقیق و توسعه	11	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع
مدیریت لجستیک	5	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

جدول ۴- زیرمعیارهای عمومی.

Table 4- General sub-criteria.

شماره	معیار	تعریف
1	هزینه	هزینه شامل تمام مخارج مرتبط با فعالیت‌های زنجیره‌تامین است.
2	کارایی	کارایی به میزان استفاده بهینه از منابع در فرآیندهای زنجیره‌تامین اشاره دارد.
3	زمان تحویل	این معیار مدت‌زمانی را که برای تحویل کالاها یا خدمات از مبدأ (مانند تامین‌کننده) به مقصد (مانند مشتری) صرف می‌شود، اندازه‌گیری می‌کند.
4	انعطاف‌پذیری	انعطاف‌پذیری توانایی زنجیره‌تامین در سازگاری با تغییرات محیطی، تغییرات تقاضا، یا اختلالات است.

۴-۲- زیرمعیارهای پایداری

جدول ۵- زیرمعیارهای پایداری.
Table 5- Sustainability sub-criteria.

شماره	معیار	تعریف
1	کاهش مصرف انرژی	به میزان کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای زنجیره‌تامین اشاره دارد.
2	انتشار گازهای گلخانه‌ای	میزان گازهای گلخانه‌ای مانند (CO2) که در طول فعالیت‌های زنجیره‌تامین تولید می‌شود. این معیار بر کاهش اثرات تمرکز دارد.
3	ظرفیت مالی	توانایی سازمان یا زنجیره‌تامین برای تامین مالی پروژه‌ها، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها، یا مقابله با شرایط بحرانی. این معیار می‌تواند شامل دسترسی به منابع مالی، نقدینگی و پایداری اقتصادی باشد.
4	استفاده از منابع تجدید پذیر	میزان استفاده از مواد یا منابعی که قابلیت بازیافت یا بازتولید دارند، مانند انرژی خورشیدی، باد، یا مواد قابل بازیافت.
5	مدیریت پسماند	به فرآیند کاهش، بازیافت یا دفع بهینه ضایعات تولیدشده در زنجیره‌تامین اشاره دارد. مدیریت موثر پسماند به کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند.
6	قرارداد کارگران	نحوه تنظیم قراردادها و شرایط کاری کارکنان در زنجیره تامین، ازجمله حقوق، مزایا و استانداردهای ایمنی. این معیار برای تضمین عدالت اجتماعی و پایداری اجتماعی در زنجیره‌تامین مهم است.

۴-۳- زیرمعیارهای تاب‌آوری

جدول ۶- زیرمعیارهای تاب‌آوری.
Table 6- Resilience sub-criteria.

شماره	شاخص	تعریف
1	تنوع منابع	به میزان تنوع تامین‌کنندگان، منابع مواد اولیه و روش‌های حمل‌ونقل در زنجیره‌تامین اشاره دارد. تنوع منابع به کاهش ریسک‌های ناشی از وابستگی به یک منبع خاص کمک می‌کند.
2	قابلیت پاسخگویی	توانایی زنجیره‌تامین در پاسخ سریع و موثر به تغییرات تقاضا، شرایط بازار، یا اختلالات پیش‌بینی‌نشده. این معیار شامل سرعت تصمیم‌گیری و انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات است.
3	مسیریابی مجدد	توانایی زنجیره‌تامین در تغییر مسیر حمل‌ونقل کالاها در پاسخ به تغییرات یا اختلالات (مانند بلایای طبیعی یا موانع لجستیکی). این معیار تضمین می‌کند که کالاها به مقصد خود با حداقل تأخیر می‌رسند.
4	منبع یابی	فرآیند شناسایی، ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان برای تامین مواد اولیه یا کالاها. این معیار به تضمین کیفیت، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان در تامین مواد اولیه کمک می‌کند.
5	سطح موجودی ایمنی	مقدار موجودی اضافی که برای جلوگیری از کمبود در صورت تغییرات پیش‌بینی‌نشده در تقاضا یا تأخیر در تامین مواد نگهداری می‌شود.
6	همکاری و شفافیت	میزان ارتباط و اشتراک‌گذاری اطلاعات میان ذینفعان زنجیره‌تامین، همکاری و شفافیت باعث بهبود هماهنگی، کاهش خطاها و افزایش اعتماد بین شرکا می‌شود.

۵- نتایج عددی

۵-۱- نتایج روش بهترین-بدترین تصادفی

در این بخش، وزن معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله تحقیق محاسبه می‌گردد. بدین منظور، در گام نخست و با همکاری خبرگان شرکت موردمطالعه، بردارهای مقایسات زوجی تشکیل شده است. در این راستا، خبرگان پرسشنامه‌های مربوطه را تکمیل نموده و میانگین پاسخ‌های حاصل به‌عنوان داده‌های ورودی برای اجرای روش موردنظر به‌کار گرفته شده است.

شایان‌ذکر است که در این پژوهش، مقایسات زوجی در قالب سه سناریوی مختلف صورت گرفته است که به شرح زیر تعریف می‌شوند:

۱. سناریوی اول : (*S1*) بیانگر شرایط خوش‌بینانه، نظیر رونق اقتصادی.
۲. سناریوی دوم : (*S2*) نمایانگر شرایط محتمل، مانند وضعیت عادی در صنعت و جامعه.
۳. سناریوی سوم : (*S3*) معرف شرایط بدبینانه، ازجمله رکود اقتصادی یا بحران‌های زنجیره تامین.

بر این اساس، با نظر خبرگان، احتمال وقوع هر یک از سناریوها نیز مشخص شده است؛ همچنین، مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی مربوطه بر روی یک رایانه با پردازنده چهارهسته‌ای و فرکانس ۲٫۸۰ گیگاهرتز و رم ۱۶ گیگابایت اجرا شده است. پیاده‌سازی مدل در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار لینگو انجام پذیرفته است.

وزن‌های به‌دست‌آمده برای معیارها و زیرمعیارها در **جدول ۷** ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در میان تمامی شاخص‌ها، معیارهایی مانند هزینه، سطح موجودی ایمنی، کاهش مصرف انرژی، کیفیت، انتشار گازهای گلخانه‌ای، کارایی و قابلیت پاسخ‌گویی به‌عنوان شاخص‌های کلیدی و برتر شناسایی شده‌اند.

جدول ۷- وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها.
Table 7- Final weight of criteria and sub-criteria.

معیار	وزن معیار		زیر معیار	وزن اولیه معیار	وزن نهایی
عمومی	0.329514	1	هزینه	0.269301	0.08873845
		2	کارایی	0.19265	0.063480872
		3	زمان تحویل	0.159933	0.052700163
		4	انعطاف پذیری	0.167622	0.055233796
		5	کیفیت	0.210494	0.06936072
پایداری	0.325832	6	کاهش مصرف انرژی	0.215287	0.069359382
		7	انتشار گازهای گلخانه¬ای	0.190456	0.064137811
		8	ظرفیت مالی	0.110445	0.039066951
		9	استفاده از منابع تجدید پذیر	0.160345	0.049588592
		10	مدیریت پسماند	0.150125	0.049516029
		11	قرارداد کارگران	0.183066	0.057082705
تاب‌آوری	0.325832	12	تنوع منابع	0.189456	0.050912186
		13	قابلیت پاسخگویی	0.203564	0.062531077
		14	مسیریابی مجدد	0.197385	0.0536132
		15	منبع یابی	0.214245	0.049137059
		16	سطح موجودی ایمنی	0.236745	0.070427684
		17	همکاری و شفافیت	0.19535	0.052919978

۵-۲- نتایج حاصل از روش ویکور فازی

در این قسمت امتیاز تامین‌کنندگان برمبنای معیارهای مساله تحقیق و با استفاده از روش ویکور فازی محاسبه گردید. در این راستا، ابتدا ماتریس تصمیم‌تشکیل شده و با استفاده از نظرات خبرگان، امتیاز تامین‌کنندگان محاسبه می‌گردد. در این پژوهش ۷ تامین کننده (چهار تامین کننده اصلی و ۳ تامین کننده پشتیبان) شرکت مورد مطالعه به شرح جدول زیر امتیاز دهی و رتبه بندی شدند. براساس نتایج حاصل از روش ویکور تصاددفی، از بین تامین کنندگان اصلی تامین کنندگان دوم و پنجم و از بین تامین کنندگان پشتیبان، تامین کننده دوم بیش‌ترین امتیاز را به‌دست آورده است.

جدول ۸- امتیاز تامین کنندگان.

Table 8- The score of the suppliers.

تامین کننده	شاخص ویکور	امتیاز
تامین کننده اصلی اول	0.294563	0.705437
تامین کننده اصلی دوم	0.13456	0.86544
تامین کننده اصلی سوم	0.53671	0.46329
تامین کننده اصلی چهارم	0.74523	0.25477
تامین کننده اصلی پنجم	0.21784	0.78216
تامین کننده پشتیبان اول	0.43567	0.56433
تامین کننده پشتیبان دوم	0.36245	0.63755
تامین کننده پشتیبان سوم	0.53478	0.46522

۵-۳- نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل ریاضی

در این پژوهش، شبکه زنجیره‌تامین شرکت سایپا کاشان، به‌عنوان یکی از شرکت‌های فعال در صنعت خودروسازی کشور، به‌عنوان مطالعه موردی موردبررسی قرار گرفته است. داده‌های موردنیاز برای تحلیل، از طریق مرور ادبیات، بررسی اطلاعات مرتبط با شرکت مذکور و اخذ نظرات خبرگان گردآوری شده‌اند.

به‌منظور حل مساله تحقیق، از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلو بیت استفاده شده است. در این مطالعه، سه سناریو شامل وضعیت بدبینانه، محتمل‌ترین وضعیت و وضعیت خوش‌بینانه در نظر گرفته شده‌اند که احتمال وقوع آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۲۵%، ۵۰% و ۲۵% می‌باشد؛ همچنین، دو نوع سیستم اطلاعاتی برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات در زنجیره‌تامین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند: سیستم سنتی (مبتنی بر ساختار کلاینت-سرور) و سیستم مبتنی بر فناوری زنجیره بلوکی (بلاک‌چین) .بر اساس نتایج، سیستم بلاک‌چین با وجود هزینه راه‌اندازی بالاتر، به‌دلیل شفافیت بیش‌تر، امنیت بالاتر و دسترسی گسترده‌تر، به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب شده است.

اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل در پیوست پژوهش ارایه شده است. **جدول ۹** ابعاد مساله تحقیق را تشریح می‌کند و **جدول ۱۰** نتایج به‌دست‌آمده از مدل را نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج نهایی، تامین‌کنندگان اصلی اول، دوم و پنجم به‌همراه تامین‌کننده پشتیبان دوم به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب شده‌اند. همچنین، مراکز تولیدی شماره ۱ و ۳ و مراکز توزیع شماره ۲ و ۴ به‌عنوان مکان‌های بهینه برای احداث انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات مبتنی بر بلاک‌چین به‌عنوان گزینه نهایی در این پژوهش شناسایی و پیشنهاد شده است.

جدول ۹- ابعاد مساله تحقیق.

Table 9- Dimensions of the research problem.

تسهیل	تعداد
تامین‌کنندگان اصلی	4
تامین‌کنندگان پشتیبان	3
مراکز بالقوه تولید	3
مراکز بالقوه توزیع	5
نقاط تقاضا	10
مشتریان آنلاین	8

جدول ۱۰- نتایج حل مدل ریاضی.

Table 10- Results of solving the mathematical model.

متغیر تصمیم	مقدار
تابع هدف اول	467493.8
تابع هدف دوم کمینه	0.23726
تابع هدف سوم بینایی	0.18448
تابع هدف چهارم امتیاز	489.56
تابع هدف پنجم	2.2169
تامین کنندگان اصلی اول، دوم و پنجم	1
تامین کننده پشتیبان دوم	1
مراکز تولیدی اول و سوم	1
مراکز توزیع دوم و چهارم	1
سیستم اشتراک گذاری اطلاعات نوع دوم	1

۶- بررسی کارایی مدل تصمیم‌گیری ارایه‌شده

در این بخش، کارایی و عملکرد مدل تصمیم‌گیری به کار گرفته‌شده با استفاده از معیارهای مشخص و مقایسه با سایر روش‌ها ارزیابی می‌شود. شایان‌ذکر است که نتایج ارایه‌شده مبتنی بر مطالعه موردی این تحقیق است و ممکن است در شرایط متفاوت قابل‌تعمیم نباشد.

۱-۶- روش بهترین بدترین تصادفی

در این بخش، عملکرد روش بهترین-بدترین تصادفی مورد تحلیل قرار گرفته و جزئیات آن به‌تفصیل تشریح می‌شود. به‌منظور ارزیابی کارایی این روش، خروجی‌های حاصل با نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر و شناخته‌شده در ادبیات پژوهش برای محاسبه وزن شاخص‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. **جدول ۱۱** نتایج این مقایسه را نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های ارایه‌شده در این جدول، می‌توان مشاهده کرد که خروجی‌های حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، با نتایج به‌دست‌آمده از روش بهترین-بدترین تصادفی، تطابق قابل‌توجهی دارند. این همخوانی نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت اطمینان بالای روش به‌کاررفته در این پژوهش برای وزن‌دهی به شاخص‌ها می‌باشد.

جدول ۱۱- مقایسه وزن معیارها در روش‌های مختلف.

Table 11- Comparison of criteria weights in different methods.

زیرمعیار	تحلیل سلسله مرتبی فازی	بهترین بدترین تصادفی
1	0.084637	0.088738
2	0.06534	0.063481
3	0.05329	0.0527
4	0.05267	0.055234
5	0.06649	0.069361
6	0.071045	0.069359
7	0.063002	0.064138
8	0.079562	0.039067
9	0.515934	0.049589
10	0.047854	0.049516
11	0.0559148	0.057083
12	0.0482577	0.050912
13	0.0608374	0.062531
14	0.051846	0.053613
15	0.050993	0.049137
16	0.73395	0.070428
17	0.054289	0.05292

۲-۶- روش ویکور فازی

یکی از رویکردهای رایج برای اعتبارسنجی روش ویکور تصادفی، مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش‌های متداول مطرح‌شده در ادبیات پژوهش است. در همین راستا، در این بخش، تامین‌کنندگان شرکت موردمطالعه با استفاده از سایر روش‌ها، شامل ویکور سنتی، ویکور فازی و تاپسیس فازی، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج این ارزیابی‌ها در **جدول ۱۲** ارایه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، خروجی‌های به‌دست‌آمده از روش‌های ویکور تصادفی، ویکور فازی و تاپسیس فازی، شباهت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. با این‌حال، نتایج حاصل از روش ویکور سنتی دارای تفاوتی جزیی با سایر روش‌هاست که این اختلاف تاثیر معناداری بر نتیجه‌گیری کلی پژوهش ندارد.

جدول ۱۲- رتبه تامین‌کنندگان.
Table 12- Supplier ranking.

	ویکور سنتی	ویکور فازی	تاپسیس فازی	ویکور تصادفی
تامین کننده اول	2	3	3	3
تامین کننده دوم	1	1	1	1
تامین کننده سوم	4	4	4	4
تامین کننده چهارم	5	5	5	5
تامین کننده پنجم	3	2	2	2

۳-۶- بررسی کارایی روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت

در اینجا، رویکردهای کلاسیک برنامه‌ریزی چندهدفه مانند روش برنامه‌ریزی آرمانی وزنی و برنامه‌ریزی آرمانی وزنی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده به‌منظور ارزیابی اثربخشی روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلو بیت مورداستفاده قرار گرفته است. روش‌های مذکور به‌طور گسترده در ادبیات علمی مورداستفاده قرار گرفته‌اند [62]، [63]. **جدول ۱۳** عملکرد این تکنیک‌ها را مقایسه می‌کند که در آن، روش استفاده شده در این پژوهش، بهترین عملکرد را در میان تمام روش‌ها نشان داده و کارایی آن را تایید می‌کند.

جدول ۱۳- مقدار انحرافات در نسخه‌های مختلف از برنامه‌ریزی آرمانی
Table 13- The values of deviation in the different defuzzification methods.

انحرافات	برنامه‌ریزی آرمانی وزنی	برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده	برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت
(d_1^+, d_1^-)	(165.5,0)	(15.7,0)	(0,0)
(d_2^+, d_2^-)	(7.3,0)	(4.3,0)	(0,0)
(d_3^+, d_3^-)	(0.268,0)	(0,0)	(0,0)
(d_4^+, d_4^-)	(24.4,0)	(0,0)	(0,0)
(d_5^+, d_5^-)	(37.5,0.185)	(11.4,0)	(0,0)
(e_1^+, e_1^-)	-	(221.5,0)	(192.6,0)
(e_2^+, e_2^-)	-	(0.119,0)	(0.98,0)
(e_3^+, e_3^-)	-	(0.185,0)	(0.126,0)
(e_4^+, e_4^-)	-	(49.1,0)	(41.7,0)
(e_5^+, e_5^-)	-	(0,0.316)	(0,0.24)

۳-۷- مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با مدل مرجع قطعی در سناریوی محتمل

به‌منظور اعتبارسنجی و تحلیل اثربخشی چارچوب تصمیم‌گیری پیشنهادی، عملکرد مدل در مقایسه با یک مدل مرجع مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. مدل مرجع از نوع چندهدفه قطعی بوده که شامل سه تابع هدف کلاسیک (حداقل‌سازی هزینه، کاهش انتشار و بیشینه‌سازی سطح خدمات) و فاقد عدم‌قطعیت ترکیبی یا شاخص‌های جدید هم‌چون بینایی زنجیره یا پیچیدگی گره‌ها است. همچنین، در مدل مرجع از روش‌های سنتی تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش بهترین-بدترین سنتی و روش ویکور سنتی برای ارزیابی تامین‌کنندگان استفاده شده است.

در مقابل، مدل پیشنهادی از ترکیب نوآورانه سه ابزار علمی بهره گرفته است: روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی برای تعیین وزن معیارها، روش ویکور تصادفی برای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان در سناریوهای مختلف و مدل‌سازی ریاضی چندهدفه فازی-تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین تحت شرایط عدم‌قطعیت می‌باشد.

برای مقایسه عددی، تحلیل‌ها در سناریوی محتمل (*S2*) انجام گرفت که منعکس‌کننده وضعیت عادی در صنعت خودروسازی است. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار لینگو نشان داد که مدل پیشنهادی در تمامی شاخص‌های کلیدی عملکرد، برتری قابل‌توجهی نسبت به مدل مرجع دارد. این مقایسه در **جدول ۱۴** ارایه شده است:

جدول ۱۴- مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با مدل مرجع قطعی در سناریوی محتمل.

Table 14- Comparison of the Proposed Model vs. Deterministic Baseline (Most Likely Scenario).

شاخص عملکرد	مدل مرجع قطعی	مدل پیشنهادی	درصد بهبود
هزینه کل زنجیره تامین	289.71	237.26	۱۸/۱% کاهش
امتیاز نهایی تامین کنندگان	412.3	489.56	۱۸/۷% افزایش
بینایی زنجیره تامین	0.142	0.18448	۲۹/۱% افزایش
ترکیب عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی	1.9265	2.2169	۱۵/۱% افزایش
انحراف نتایج بین سناریوها (پایداری مدل)	٪15.3±	٪6.7±	۵۶/۱% پایداری بیش‌تر

به‌صورت کلی، نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی دارای مزایایی به شرح زیر می‌باشد:

۱. کاهش محسوس هزینه‌ها :ترکیب مدل‌های ارزیابی دقیق‌تر تامین‌کنندگان و استفاده از استراتژی‌های مقاوم‌سازی شبکه موجب کاهش ۱۸% در هزینه کل شده است. این کاهش می‌تواند از منظر سیاست‌گذاران صنعتی و مدیران ارشد بسیار حائز اهمیت باشد، به‌ویژه در شرایط ناپایدار بازار.

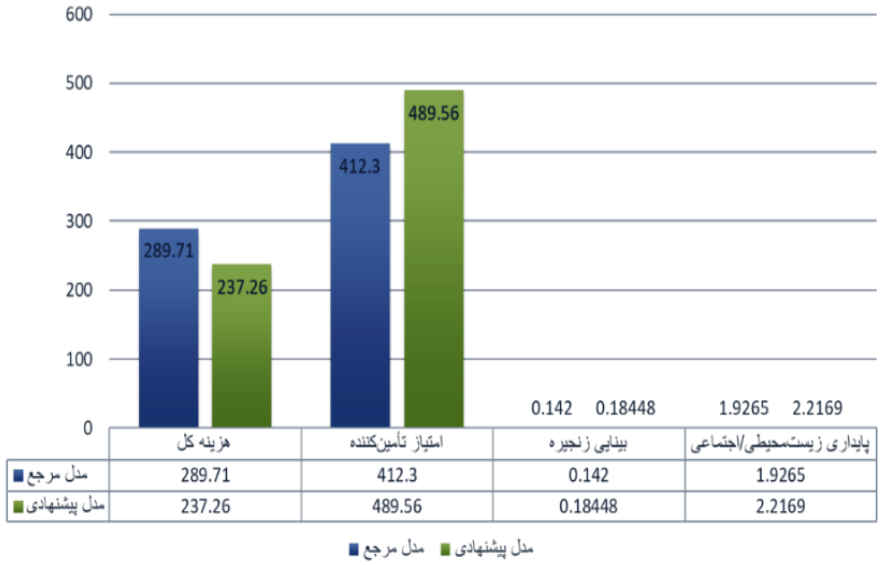
۲. ارتقای قابل‌توجه در دقت انتخاب تامین‌کنندگان: افزایش ۱۹% در امتیاز تامین‌کنندگان بیانگر آن است که مدل پیشنهادی توانسته درک عمیق‌تری از ترجیحات تصمیم‌گیرندگان تحت عدم‌قطعیت ارایه دهد و گزینه‌هایی با ارزش واقعی بالاتر را شناسایی کند.

۳. افزایش بینایی و کاهش ریسک زنجیره تامین :یکی از شاخص‌های نوآورانه مدل، میزان "بینایی زنجیره تامین" است که با لحاظ سیستم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات و قابلیت شناسایی اختلالات اندازه‌گیری شده است. مدل پیشنهادی با افزایش ۳۰% در این شاخص، پتانسیل کاهش ریسک‌های عملیاتی را فراهم می‌سازد.

۴. توسعه پایداری سه‌بعدی زنجیره :شاخص ترکیبی عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی که هم به کاهش آلاینده‌ها و هم ایجاد اشتغال توجه دارد، در مدل پیشنهادی حدود ۱۵% بهبود نشان داده است.

۵. پایداری تصمیم‌گیری در سناریوهای مختلف :نتایج مدل پیشنهادی در سه سناریو خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه، پایداری عددی بالاتری دارد (۶/۷±% در برابر ۱۵/۳±% در مدل مرجع) که نشان‌دهنده قدرت استوار مدل در مقابله با تغییرات محیطی است.

در مجموع، این تحلیل عددی نشان می‌دهد که چارچوب تصمیم‌گیری پیشنهادی با ادغام دقیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌سازی پیشرفته عدم‌قطعیت، می‌تواند به‌طور موثری عملکرد، تاب‌آوری و پایداری زنجیره‌تامین را در صنایع پیچیده و پر ریسک مانند خودروسازی بهبود بخشد. **شکل ۲** مقایسه عملکرد این دو مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی و مدل قطعی.

Figure 2- Performance Comparison of the Proposed and Deterministic Models.

۷- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارایه یک مدل چندهدفه برای مدیریت زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور در صنعت خودروسازی انجام شده است. مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پایداری در کنار مولفه‌های تاب‌آوری، راه‌کاری جامع برای مقابله با چالش‌های موجود در این صنعت ارایه می‌دهد.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است هزینه‌های مرتبط با زنجیره تامین، شامل تامین مواد اولیه، تولید، حمل‌ونقل و تاسیسات را بهینه‌سازی کند. همچنین، هزینه‌های ناشی از کمبود یا اختلال در تامین کالا با بهره‌گیری از تامین‌کنندگان پشتیبان به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. از منظر زیست‌محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق به‌کارگیری سیستم‌های حمل‌ونقل بهینه، انتخاب تامین‌کنندگان دوستدار محیط‌زیست و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت پسماند کاهش یافته است.

از بعد اجتماعی، مدل با ایجاد فرصت‌های شغلی جدید، تضمین قراردادهای عادلانه برای نیروی کار و تقویت عدالت اجتماعی در زنجیره تامین، تاثیرات مثبتی از خود برجای گذاشته است. افزون بر این، تنوع در منابع تامین مواد اولیه و استفاده از تامین‌کنندگان جایگزین، موجب کاهش وابستگی به منابع خاص و افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره‌تامین در مواجهه با اختلالات شده است. همچنین، ظرفیت‌سازی در مراکز تولید و توزیع، امکان واکنش سریع به تغییرات پیش‌بینی‌نشده را فراهم کرده است. به‌علاوه، بهره‌گیری از سیستم‌های شفافیت اطلاعات و بهبود ارتباطات میان اجزای مختلف زنجیره تامین، فرایند تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی را تسهیل کرده است.

۷-۱- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

اعتبارسنجی در سایر صنایع: بررسی و ارزیابی مدل در صنایعی نظیر داروسازی، مواد غذایی و فناوری برای سنجش قابلیت تعمیم‌پذیری آن.

استفاده از فناوری‌های نو ین: به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین و اینترنت اشیا برای افزایش شفافیت، امنیت و تاب‌آوری زنجیره تامین.

یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی برای افزایش دقت و سرعت حل مدل.

گسترش مقیاس مدل: توسعه مدل برای زنجیره‌های تامین بین‌المللی با در نظر گرفتن عوامل فرهنگی، قانونی و سیاسی به‌منظور پوشش گسترده‌تر.

این پیشنهادها می‌توانند مسیرهای جدیدی برای گسترش تحقیقات در زمینه زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور فراهم آورند.

مشارکت نویسندگان

طراحی تحقیق، توسعه مدل مفهومی و گردآوری داده‌ها توسط نو یسنده اول انجام شده است. تحلیل نتایج، تدو ین مدل ریاضی و نگارش اولیه مقاله با همکاری هر دو نو یسنده صورت گرفته است. بازنگری نهایی، آماده‌سازی نسخه ارسال و پاسخ‌دهی به داوران توسط نو یسنده دوم انجام شده است. هر دو نو یسنده مسئولیت کامل صحت مطالب را می‌پذیرند.

تعارض منافع

نو یسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی یا شخصی در رابطه با این مقاله وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از طریق همکاری با شرکت خودروسازی سایپا کاشان و بر مبنای پرسشنامه‌های خبرگان گردآوری شده‌اند. در صورت درخواست رسمی، داده‌های پردازش‌شده می‌توانند در اختیار خوانندگان قرار گیرند.

منابع مالی

این پژوهش از حمایت مالی هیچ نهاد، موسسه یا طرح پژوهشی خاصی بهره‌مند نبوده است و به‌طور مستقل توسط نو یسندگان انجام شده است.

تقدیر و تشکر

نو یسندگان از کارشناسان زنجیره‌تامین شرکت سایپا کاشان بابت همکاری در تکمیل پرسشنامه‌ها و ارایه داده‌های موردنیاز تشکر و یژه به عمل می‌آورند. همچنین، از سردبیر و داوران محترم نشریه بابت بازخوردهای سازنده و ارزشمندشان کمال امتنان را دارند.

منابع

[1] Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European journal of operational research*, *227*(1), 199–215. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017

[2] Edalatpanah, S. A., Komazec, N., & Pamucar, D. (2024). Big data and computing visions, *4*(3), 201–218. https://julista.sinaweb.net/article_207199_350289d4d91b8f78a445231a6074c47c.pdf

[3] Montazeri, F. Z., & Sorourkhah, A. (2024). Robust-fuzzy-probabilistic optimization for a resilient, sustainable supply chain with an inventory management approach by the seller. *Big data and computing visions*, *4*(2), 146–163. https://doi.org/10.22105/bdcv.2024.481945.1208

[4] Ikpe, A. E. (2024). thermodynamic analysis and energy balance for environmental sustainability of simple gas turbine inlet cooling system in afam power plant, *Computational algorithms and numerical dimensions*, *3*(1), 79–93. https://doi.org/10.22105/cand.2024.463423.1097

[5] Aliu, O. R. (2025). How realistic is low carbon development for developing countries that is development without significant exploitation of fossil fuels ?,*Systemic analytics*, *3*(1), 1–7. https://doi.org/10.31181/sa31202536

[6] Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science*, *14*, 681-695. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5

[7] Lotfi, R., Weber, G. W., & Tirkolaee, E. B. (2023). Recent advances in viable and sustainable supply chain management. *Environmental science and pollution research*, *30*(39), 89943–89944. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28810-4

[8] Rabbani, M., Hosseini-Mokhallesun, S. A. A., Ordibazar, A. H., & Farrokhi-Asl, H. (2020). A hybrid robust possibilistic approach for a sustainable supply chain location-allocation network design. *International journal of systems science: operations & logistics*, *7*(1), 60–75. https://doi.org/10.1080/23302674.2018.1506061

[9] Nayeri, S., Zhain, V. M., Asadi, Z., Sazvar, Z., & Javadian, N. (2024). Raw material provider selection problem considering the digitalization, circular economy and resilience dimensions: a case study. *International journal of industrial engineering & production research*, *35*(3), 1-20. https://doi.org/10.22068/ijiepr.35.3.1997

[10] Babaei, Y. S., Sazvar, Z., Nayeri, S., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2024). A two-stage framework for a resilient medical tourism supply chain considering social aspects and supplier evaluation under uncertainty: A real-case study. *Annals of operations research*, 1-47. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06128-9

[11] Silva, A. C., Marques, C. M., & de Sousa, J. P. (2023). A simulation approach for the design of more sustainable and resilient supply chains in the pharmaceutical industry. *Sustainability*, *15*(9), 7254. https://doi.org/10.3390/su15097254
[12] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2022). A global-responsive supply chain considering sustainability and resiliency: Application in the medical devices industry. *Socio-economic planning sciences*, *82*, 101303. https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101303
[13] Subramanian, B., Mishra, A., Ramkumar, B. V., Mandala, G., Kathamuthu, N. D., & Srithar, S. (2025). Big data and fuzzy logic for demand forecasting in supply chain management: a data-driven approach. *Journal of fuzzy extension and applications*, *6*(2), 260–283. https://doi.org/10.22105/jfea.2025.488816.1703
[14] Hoseini, S. A., Hashemkhani Zolfani, S., Skačkauskas, P., Fallahpour, A., & Saberi, S. (2021). A combined interval type-2 fuzzy MCDM framework for the resilient supplier selection problem. *Mathematics*, *10*(1), 44. https://www.mdpi.com/2227-7390/10/1/44
[15] Fallahpour, A., Olugu, E. U., Musa, S. N., Wong, K. Y., & Noori, S. (2017). A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management. *Computers & industrial engineering*, *105*, 391-410. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.005
[16] Mohammed, A., Bai, C., Channouf, N., Ahmed, T. Al, & Mohamed, S. M. (2023). G-resilient multi-tier supplier selection and order allocation in food industry: a hybrid methodology. *International journal of systems science: operations and logistics*, *10*(1). https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2195055
[17] Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, *242*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317
[18] Amiri, M., Hashemi-Tabatabaei, M., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabaee, M., Zavadskas, E. K., & Banaitis, A. (2020). A new fuzzy BWM approach for evaluating and selecting a sustainable supplier in supply chain management. *International journal of sustainable development and world ecology*. https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1793424
[19] Ramezankhani, M. J., Torabi, S. A., & Vahidi, F. (2018). Supply chain performance measurement and evaluation: A mixed sustainability and resilience approach. *Computers & industrial engineering*, *126*, 531-548. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.054
[20] Aldrighetti, R., Battini, D., Ivanov, D., & Zennaro, I. (2021). Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: a review and future research directions. *International Journal of Production Economics*, *235*, 108103. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108103
[21] Elham Moghimi, Adel Az & ,Mahmoud Dehghan Nair. (2024). Modeling key performance indicators and resilience elements with a structural equation modeling approach .*Innovation management & operational strategies* , *5*(4), 381-401. (**In Presion**). https://search.ebscohost.com
[22] Alavi, B., Tavana, M., & Mina, H. (2021). A dynamic decision support system for sustainable supplier selection in circular economy. *Sustainable production and consumption*, *27*, 905–920. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.015
[23] Wu, C., Lin, Y., & Barnes, D. (2021). An integrated decision-making approach for sustainable supplier selection in the chemical industry. *Expert systems with applications*, *184*, 115553. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115553
[24] Homayouni, Z., Pishvaee, M. S., Jahani, H., & Ivanov, D. (2023). A robust-heuristic optimization approach to a green supply chain design with consideration of assorted vehicle types and carbon policies under uncertainty. *Annals of operations research*, 1-41. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03985-6
[25] Burke, H., Zhang, A., & Wang, J. X. (2023). Integrating product design and supply chain management for a circular economy. *Production planning & control*, *34*(11), 1097–1113. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1983063
[26] Deliktaş, D., Karagoz, S., Simić, V., & Aydin, N. (2023). A stochastic Fermatean fuzzy-based multi-choice conic goal programming approach for sustainable supply chain management in end-of-life buildings. *Journal of cleaner production*, *382*, 135305. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135305
[27] Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, *227*, 1195–1209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.098
[28] Jiang, M., Jia, F., Chen, L., & Xing, X. (2024). Technology adoption in socially sustainable supply chain management: Towards an integrated conceptual framework. *Technological forecasting and social change*, *206*, 123537. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123537
[29] Asadi, Z., Khatir, M. V., & Rahimi, M. (2022). Robust design of a green-responsive closed-loop supply chain network for the ventilator device. *Environmental science and pollution research*, 1–21. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19105-1
[30] Mastos, T. D., Gotzamani, K., Ieromonachou, P., & Tsiotras, G. (2024). A structural equation model for sustainable supply chain management in the food industry. *Foods*, *13*(23), 3713. https://www.mdpi.com/2304-8158/13/23/3713
[31] Habib, M. S., Omair, M., Ramzan, M. B., Chaudhary, T. N., Farooq, M., & Sarkar, B. (2022). A robust possibilistic flexible programming approach toward a resilient and cost-efficient biodiesel supply chain network. *Journal of cleaner production*, *366*, 132752. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132752
[32] Leong, W. Y., Wong, K. Y., & Wong, W. P. (2022). A new integrated multi-criteria decision-making model for resilient supplier selection. *Applied system innovation*, *5*(1), 8. https://www.mdpi.com/2571-5577/5/1/8
[33] Goldbeck, N., Angeloudis, P., & Ochieng, W. (2020). Optimal supply chain resilience with consideration of failure propagation and repair logistics. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *133*, 101830. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.101830
[34] Uzoma Okwudili Nnaji, Lucky Bamidele Benjamin, Nsisong Louis Eyo-Udo, & Emmanuel Augustine Etukudoh. (2024). Strategies for enhancing global supply chain resilience to climate change. *International journal of management & entrepreneurship research*, *6*(5), 1677–1686. https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i5.1141
[35] Cinti, A., Marcone, M. R., Sabatini, A., & Temperini, V. (2025). Enhancing supply chain resilience through the supply network approach. *Journal of business & industrial marketing*, *40*(4), 858-876. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jbim-02-2023-0106/full/html
[36] Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *149*, 102279. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102279

[37] Fallahpour, A., Nayeri, S., Sheikhalishahi, M., Wong, K. Y., Tian, G., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). A hyper-hybrid fuzzy decision-making framework for the sustainable-resilient supplier selection problem: a case study of Malaysian Palm oil industry. *Environmental science and pollution research*, 1–21. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12491-y

[38] Bayatzadeh, S., & Talaie, H. (2024). Identifying and Evaluating of Sustainable and Resilient Supplier Selection Criteria According to Industry 5.0 Concepts (Case Study: Steel Industry). *Tasmimgiri va tahqiq dar amaliyyat*, *9*(4), 1045–1063. https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904

[39] Zeinab Asadi, Hassanali Aghajani, Mohammad Valipour Khatir & ,Erfan Babai Ghadikalai. (2024). Presenting a fuzzy mixed decision-making approach to evaluate suppliers based on the dimensions of the fifth industrial revolution and sustainable supply chain: A case study of medical equipment. *Journal of decisions & operations research*, *9(2)*, 399-418. (**In Presion**). https://search.ebscohost.com

[40] Shabbir, M. S., Mahmood, A., Setiawan, R., Nasirin, C., Rusdiyanto, R., Gazali, G., ... & Batool, F. (2021). Closed-loop supply chain network design with sustainability and resiliency criteria. *Environmental science and pollution research*, 1-16. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12980-0

[41] Foroozesh, N., Karimi, B., Mousavi, S. M., & Mojtahedi, M. (2023). A hybrid decision-making method using robust programming and interval-valued fuzzy sets for sustainable-resilient supply chain network design considering circular economy and technology levels. *Journal of industrial information integration*, *33*. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100440

[42] Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (2022). Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption. *Sustainable production and consumption*, *30*, 278-300. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.003

[43] Kayani, S. A., Warsi, S. S., & Liaqait, R. A. (2023). A smart decision support framework for sustainable and resilient supplier selection and order allocation in the pharmaceutical industry. *Sustainability (switzerland)*. https://doi.org/10.3390/su15075962

[44] Agarwal, R., & Nishad, A. K. (2024). A Fuzzy Mathematical Modeling for Evaluation and Selection of a Best Sustainable and Resilient Supplier by Using EDAS Technique. *Process integration and optimization for sustainability*, *8*(1), 71–80. https://doi.org/10.1007/s41660-023-00352-9

[45] Chaouni Benabdellah, G., Bennis, K., Chaouni Benabdellah, A., & Zekhnini, K. (2022). Resilient sustainable supplier selection criteria assessment for economics enhancement in industry 4.0 context. *IFIP advances in information and communication technology* (Vol. 639 IFIP, pp. 194–208). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94335-6_14

[46] Koç, S., Erden, C., Ateş, Ç., & Ceviz, E. (2024). Evaluation of potential logistics village alternatives using bayesian best-worst method. *Optimality*, *1*(1), 100-120. https://doi.org/10.22105/opt.v1i1.35

[47] Karimi, H., Sadeghi-Dastaki, M., & Javan, M. (2020). A fully fuzzy best–worst multi attribute decision making method with triangular fuzzy number: A case study of maintenance assessment in the hospitals. *Applied soft computing*, *86*, 105882. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105882

[48] Sazvar, Z., Tavakoli, M., Ghanavati-Nejad, M., & Nayeri, S. (2022). Sustainable-resilient supplier evaluation for high-consumption drugs during COVID-19 pandemic using a data-driven decision-making approach. *Scientia iranica*. https://doi.org/10.24200/sci.2022.59789.6424

[49] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Designing an IoT-enabled supply chain network considering the perspective of the Fifth Industrial Revolution: Application in the medical devices industry. *Engineering applications of artificial intelligence*, *122*, 106113. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106113

[50] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. *Expert systems with applications*, *213*, 119267. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119267

[51] Shakerian Hagigi, S., Nezhad Heydari, Z., Raeiszadeh, M., & Qayumi, M. (2023). Selection of the best contractor by AHP and VIKOR method, a case study of an executive project in the dairy industry. *Modern research in performance evaluation*, *2*(2), 79-90. (**In Presion**). https://www.journal-mrpe.ir/article_181692_ea3eab244553df51ff2f24a4150fb984.pdf

[52] Nayeri, S., Torabi, S. A., Tavakoli, M., & Sazvar, Z. (2021). A multi-objective fuzzy robust stochastic model for designing a sustainable-resilient-responsive supply chain network. *Journal of cleaner production*, *311*, 127691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127691

[53] Alamroshan, F., La'li, M., & Yahyaei, M. (2022). The green-agile supplier selection problem for the medical devices: a hybrid fuzzy decision-making approach. *Environmental science and pollution research*, *29*(5), 6793–6811. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14690-z

[54] Solgi, O., Gheidar-Kheljani, J., Dehghani, E., & Taromi, A. (2021). Resilient supplier selection in complex products and their subsystem supply chains under uncertainty and risk disruption: A case study for satellite components. *Scientia iranica*. https://doi.org/10.24200/SCI.2019.52556.2773

[55] Zahiri, B., Zhuang, J., & Mohammadi, M. (2017). Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *103*, 109–142. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.009

[56] Taheri, F., & Moghaddam, B. F. (2022). A heuristic-based hybrid algorithm to configure a sustainable supply chain network for medical devices considering information-sharing systems. *Environmental science and pollution research*, *29*(60), 91105-91126. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22147-0

[57] Gholizadeh, H., Fazlollahtabar, H., & Khalilzadeh, M. (2020). A robust fuzzy stochastic programming for sustainable procurement and logistics under hybrid uncertainty using big data. *Journal of cleaner production*, *258*, 120640.

[58] Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. *Computers & industrial engineering*, *148*, 106716. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106716

[59] Gütmen, S., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2024). An overview of weighted goal programming: a multi-objective transportation problem with some fresh viewpoints. *Central european journal of operations research*, *32*(3), 557-568. https://doi.org/10.1007/s10100-023-00861-5

[60] Nayeri, S., Tavakoli, M., Tanhaeean, M., & Jolai, F. (2022). A robust fuzzy stochastic model for the responsive-resilient inventory-location problem: comparison of metaheuristic algorithms. *Annals of operations research*, 1-41. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03977-6

[61] Tirkolaee, E. B., Mardani, A., Dashtian, Z., Soltani, M., & Weber, G.-W. (2020). A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design. *Journal of cleaner production*, *250*, 119517. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119517

[62] Rostami, O., Tavakoli, M., Tajally, A. R., & GhanavatiNejad, M. (2023). A goal programming-based fuzzy best–worst method for the viable supplier selection problem: a case study. *Soft computing*, *27*(6), 2827–2852. https://doi.org/10.1007/s00500-022-07572-0

[63] Mamashli, Z., Nayeri, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sazvar, Z., & Javadian, N. (2021). Designing a sustainable–resilient disaster waste management system under hybrid uncertainty: A case study. *Engineering applications of artificial intelligence*, *106*, 104459. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104459